



الديموقراطية الشعبية الجزائرية



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر

UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de génie civil et de l'hydraulique

PROJET DE FIN DE CYCLE

Présenté pour l'obtention du diplôme de master en Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES DES GRANULATS DE LA REGION DE SAÏDA SUR LA FORMULATION OPTIMALE DU BETON

Présenté par :

M. FEKHAT Kada

M. BENAMIAR Kouider

Soutenu le 18/ 06 / 2026, devant le jury composé de :

M^{me}. BENGUEDIB S.Présidente

M. GUERROUDJ H. Z.Examineur

M. ZIDANI M. BEncadreur

Année universitaire 2025/2026

Remerciement

Nous remercions avant tous, ALLAH qui nous a montrées le chemin du savoir et nous a inspiré le courage et la volonté d'achever ce modeste travail et notre premier éducateur notre prophète MOHAMED que le salut soit sur lui.

Nous tenons à exprimer notre profond respect à notre promoteur Monsieur Zidani M. Berrezoug pour avoir accepté de nous encadrer et nous soutenir tout au long de ce travail par : ses conseils, ses orientations, surtout pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Nos remerciements s'adressent aussi au personnel du Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (L.T.P.O) de SAIDA pour son aide.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à M. YAGHNEM Reda, M. GERROUDJ Hichem et Mme BENGHEDIAB Soumia pour leur précieuse collaboration. Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Civil.

Remerciement.....	
Résumé :	
ملخص:	
Abstract :	
INTRODUCTION GENERALE	12
Introduction générale :	2
CHAPITRE I Contexte géologique et géotechnique de la région de Saïda	3
I. Introduction :	4
I-1. Généralités :	4
I-1-1. Présentation géographique et géomorphologique de la région de Saïda :	4
I-1-1-1. Situation géographique des monts de Saïda:	4
I-1-2. Ressources hydriques et implications pour l'ingénierie civile :	5
I-2. Aspect géologique et potentiel minier de la région de Saïda :	5
I-2-1. Cadre géologies de la région de Saïda :	5
I-2-1-1. Contexte géologique général :	5
I-2-1-2. Synthèse lithostratigraphique:	5
I-2-1-3. Particularités géologiques de la région:	6
I-2-2. Potentiel minier de la région de Saïda:	6
I-2-2-1. Aperçu general:	6
I-2-2-2. Ressources en matériaux pour le génie civil:	6
I-2-2-3. Indices métallifères:	7
I-2-2-4. Présentation des unités minières opérationnelles de la région de SAIDA :	11
I-3. Conclusion :	13
Chapitre II ANALYSE D'IDENTIFICATION DES CARRIERES LOCALES	14
II. Introduction :	15
II.1. Généralités sur les granulats :	15
II.2. Présentation des granulats étudiés :	16
II.3. Prélèvement d'échantillons :	16
II.3.1. Définition de l'échantillonnage :	16
II.3.2. Les phases de l'échantillonnage :	17
II.3.2.1. Prélèvement sur tas normaux :	17
II.3.2.2. Échantillonneur :	18
II.4. Représentation des carrières visitées :	19
II.5. Essais réalisés sur les granulats (sables et graviers) :	19
II.5.1. Propriétés dimensionnelles :	19
II.5.1.1. Analyse granulométrique par voie sèche :	19
II.5.1.2. Résultats de la granulométrie des carrières visitées :	21
II.5.2. Module de finesse :	35
II.5.3. Propriétés physico-chimiques :	37
II.5.3.1. Masse volumique absolue :	37
II.5.3.2. Masse volumique réelle :	38
II.5.3.3. Masse volumique apparente :	39

II.5.3.4. Absorption :	41
II.5.3.5. Porosité et compacité :	42
II.5.3.6. Teneur en eau :	43
II.5.3.7. Propreté et forme des granulats	45
II.5.4. Caractéristiques mécaniques :	51
II-5-4-1. Résistance au choc (Essai Los Angeles) :	51
II.5.4.2. Essai Micro-Deval :	54
II.6. Conclusion:	56
CHAPITRE III ANALYSE DU CIMENT UTILISÉ ET ÉTUDE DE LA COMPOSITION DU BÉTON	57
III.1. Généralités sur le béton :	58
III.1.2. Constituants du béton :	58
III.1.3. Principe de formulation du béton :	58
III.1.4. Avantages et inconvénients du béton :	58
Avantages :	58
Inconvénients :	58
III.1.5. Importance du ciment dans le béton :	59
III.2. Généralités sur le ciment :	59
III.2.1. Définition du ciment :	59
III.2.2. Historique et évolution du ciment :	59
III.2.3. Rôle du ciment dans les matériaux cimentaires :	59
III.3. Constituants principaux du ciment et additions minérales :	59
III.3.1. Clinker :	60
III.3.2. Laitier granulé de haut fourneau :	61
III.3.3. Cendres volantes :	61
III.3.4. Pouzzolanes :	62
III.3.5. Fillers calcaires :	62
III.4. Principe de fabrication du ciment Portland :	63
III.4.1. Fabrication du ciment par voie humide :	64
III.4.2. Fabrication du ciment par voie sèche :	66
III.5. Différents types de ciment :	70
III.5.1. Classification des ciments en fonction de leur composition :	70
III.5.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance :	71
III.6. Présentation du ciment utilisé dans cette étude	73
III.6.1. Définition du ciment Portland composé CEM II	73
III.6.2. Composition chimique et minéralogique du CEM II	73
III.6.3. Caractéristiques physiques et mécaniques du CEM II	73
III.6.4. Domaines d'utilisation du CEM II	73
III.6.5. Justification du choix du CEM II pour cette étude	73
III.7. Essais en laboratoire sur le ciment :	74
III.7.1. Masse volumique absolue du ciment :	74
III.7.2. Masse volumique apparente :	76

III.7.3. Détermination des temps de début et de fin de prise :	76
III.7.4. Détermination de la consistance normalisée de la pâte de ciment :	79
III.7.5. Détermination de la stabilité du ciment (Essai Le Chatelier) :	81
III.8. Formulation granulaire du béton	84
III.8.1. Généralités sur la composition granulaire.....	84
III.8.2. Méthode de Faury.....	84
III.8.3. Courbes granulométriques de référence de Faury.....	84
III.8.4. Courbes granulométriques des matériaux utilisés.....	84
III.8.5. Analyse et interprétation des résultats.....	86
III.9. Conclusion :	87
CHAPITRE IV COMPOSITION DE BETON PAR LA METHODE DE FAURY ET CONFECTION DES EPROUVETTES	88
IV. Introduction :	89
IV-1. Critères d'optimisation d'un béton :	89
IV.2. Principe de la Méthode de FAURY :	91
IV.3. Méthode de Calcul et Formalisme Mathématique :	91
IV.4. Détermination des pourcentages volumétriques des constituants :	96
IV.5. Confection et conservation des éprouvettes :	97
IV.5.1. Caractéristiques géométriques des moules :	97
IV.5.2. Serrage et cure du béton :	97
IV.6. Évaluation de l'ouvrabilité du béton frais :	97
IV.6.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams :	97
IV.6.2. Essai d'information :	99
IV.6.3. Essais de compression :(Norme NF P 18-406) :	100
IV.7. Conclusion :	106
CONCLUSION GENERALE	107
Conclusion générale :	108

Figure I- 1 : Répartition des carrières et gisements dans la wilaya de Saïda [6].....	8
Figure I-2: Carte des ressources minières de la région de Saïda [6]	9
Figure I- 3 :Carte géologique simplifiée de la région de Saïda [6]	9
Figure II-4 : Photo n°01 concasseur de la carrière SARL O. OUALI de sidi boubker.....	12
Figure II-5 : Photo n°02 concasseur de la carrière EURL S.L.I.G.O.S de ELMERDJA.....	12
Figure II-6 : Photo n°03 concasseur de la carrière SARL EL. HILAL d’AIN ZARGGA.....	12
Figure II-1 : échantillonnage du gravier (carrière EURL S.L.I.G.O.S).....	17
Figure II-2 : les matériaux en stock	18
Figure II-3 : Opération de quartage.....	18
Figure II-4 : Échantillonneur.....	18
Figure II.5: Tamiseuse électrique et les tamis.....	19
Figure II-6 : Essai d’équivalent de sable	46
Figure II-7 : Essai au bleu de méthylène	48
Figure II-8 : Appareil pour essai Los Angeles	53
Figure II-9 : Appareil pour Essai Micro-Deval.....	55
Figure III-1 : Le schéma de la fabrication du ciment	68
Figure III-2 : Fabrication du ciment.....	69
Figure III-3 : Appareil de Vicat muni de l’aiguille amovible	79
Figure III-4 : Essai de stabilité avec l’appareil le chantelier	82
Figure IV-1 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	98
Figure IV-2 : Principe du surfaçage l'éprouvette	101
Figure IV-3 : Centrage et positionnement de l'éprouvette.....	102
Figure IV.4 : Mode de rupture conique typique sous l'effet du frettage	103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I- 1 : Colonne litho stratigraphique des Monts de Saïda [6]	10
Tableau I-2-a : tableau représentatif du potentiel minier de la région de Saida (carrière à agrégats) [6]	11
Tableau I-2-b : tableau représentatif du potentiel minier de la région de Saida (carrière à matériaux minéraux) [6].....	13
Tableau II.1 : Carrières visitées	19
Tableau II.2: Dimensions nominales des tamis.....	20
Tableau II.3 : représentants les valeurs des dimensions d'un gravier 8/15de la carrière de SARL O. OUALI (Sidi boubker)	22
Tableau II.4 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 3/8 de la carrière de SARL O. OUILI (Sidi boubker)	23
Tableau II.5 : représentant les valeurs des dimensions d'un sable 0/3 de la carrière de SARL O. OUALI (Sidi boubker).....	24
Tableau II-6 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 8/15de la carrière EURL. S.L.I.G.O.S (merdja).....	26
Tableau II-7 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 3/8 de la carrière de EURL.S.L.I.G.O. S (merdja).....	27
Tableau II-8 : représentant les valeurs des dimensions d'un sable 0/3 de la carrière de EURL.S.L.I.G.O. S (merdja).....	28
Tableau II-9 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 8/15de la carrière de SARL EL HILLAL (ain zergga)	30
Tableau II-10 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 3/8 de la carrière de SARL EL HILLAL (ain zergga)	31
Tableau II-11 : représentant les valeurs des dimensions d'un sable 0/3 de la carrière de SARL EL HILLAL (ain zergga) :.....	32
Tableau II.12 : Modules de finesse des échantillons prélevés.....	36
Tableau II-13 : résultats de laboratoire.....	41
Tableau II-14 : Le coefficient d'absorption	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-15 : Les résultats obtenus de ces caractéristiques physico-chimiques	45
Tableau II-16 : Les Valeurs usuelles du bleu de méthylène.....	49
Tableau II-17 : Les résultats obtenus de l'équivalent de sable et bleu de méthylène	49
Tableau II-18 : Forme des granulats à prendre en consideration	51
Tableau II-19 : Les résultats obtenus des caractéristiques mécaniques des granulats.....	51
Tableau II-20 : Les Valeurs usuelles de l'Essai Los Angeles	53
Tableau II-21 : Les résultats obtenus pour l'essai Los Angeles.....	54
Tableau II-22 : Les résultats obtenus pour l'essai Micro-Deval	55
Tableau III-1 : Classification des ciments selon la norme EN 197-1	71
Tableau III-2 : Classes de résistance des ciments selon EN 197-1	72
Tableau III-3 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition....	72
Tableau IV-1 : Valeurs usuelles du coefficient de compacité K (Modèle de FAURY).	93
Tableau IV-2 : Valeurs du coefficient A de Faury	95
Tableau IV-3 : Revenant à notre exemple de la carrière SARL EL HILAL :	96
Tableau IV-4 des Classes de Consistance.....	99
Tableau IV-5-a : les résultats de crassement de l'éprouvette a 14 jour.....	104
Tableau IV-5-b : les résultats de crassement de l'éprouvette ont 28 jours	105

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

LTPO : Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (L.T.P.O) de SAIDA

M : Masse de l'échantillon

D : Diamètre maximal du gros granulat

Ms : Masse sèche

Ri : Refus cumulé

Rn : Refus partiel sur le tamis

Tn : Dernier tamis

MF : Modules de finesse

ρ_s : la masse volumique absolue

Msec : Masse de l'échantillon sec.

M₁ : Masse du pycnomètre + échantillon + liquide.

M₂ : Masse du pycnomètre rempli de liquide seul.

$\rho_{liquide}$: Masse volumique du liquide utilisé (pour l'eau, on prend généralement (1g/cm³ ou 1000 kg/m³).

SSS : Saturé à Surface Sèche.

Mw : masse apparente dans l'eau

ρ_{rd} : la masse volumique réelle

ρ_{eau} : la masse volumique l'eau

V : volume du récipient (Un cylindre métallique)

M₀ : la masse de récipient vide

M₁ : : la masse de récipient rempli de granulats (cm³ ou m³)

Ab : coefficient d'absorption

P : la porosité

C : la compacité

E : poids d'eau dans le matériau

Ps : poids du matériau sec

Ph : poids matériau humide

W : La teneur en eau

γ_d : Masse volumique apparente (t/m³)

γ_d : Masse volumique absolue (t/m³)

ES : L'équivalent de sable

h₂ : Hauteur du sable

h₁ : Hauteur totale

VBS : la valeur au bleu de méthylène

V : Volume total de solution de bleu de méthylène versée pour atteindre la saturation, en cm³

Cm : Concentration de la solution de bleu de méthylène généralement 10 g

ms : Masse de la prise d'essai de sol sec, en g

L : La longueur : elle correspond à la distance maximale séparant deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat).

E : L'épaisseur (elle représente la distance minimale entre deux plans parallèles tangents au granulat).

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

G : La grosseur (elle correspond à la dimension de la plus petite maille carrée du tamis permettant le passage du granulat).

A : le coefficient d'aplatissement

β : L'indice d'allongement

α : L'indice d'aplatissement

P (%) : le coefficient de Propreté des granulats

LA : Le coefficient de Los Angeles

M' : la masse de granulats restants

M : la masse des éléments de dimension inférieure à 1,6 mm

MDE : Micro-Deval

(CaO) : la Chaux

(SiO₂) : le Silice

(Al₂O₃) : l'Alumine

(MgO) : le Magnésie

ρ_c : masse volumique absolue du ciment (g/cm³)

ρ_t : masse volumique du liquide utilisé (g/cm³)

m_c : masse du ciment (g)

m_t : masse du liquide de même volume (g)

(E/C) : Eau/Ciment

D : Le diamètre maximal théorique recherché du granulat (en mm).

d1 : L'ouverture de la maille du tamis immédiatement inférieure à D (en mm).

d2 : L'ouverture de la maille du tamis immédiatement inférieure à d1 (en mm).

X : Le pourcentage massique des grains cumulés retenus sur le tamis d1 (le refus cumulé sur d1).

Y : Le pourcentage des grains de la fraction granulaire comprise entre les tamis d1 et d2 (le tamisat intermédiaire).

D_{MAX} : Dimension maximale des granulats (mm).

B : Coefficient correcteur lié à la consistance du béton (B = 2 pour un béton mou ; B = 1 pour un béton très ferme).

R : Rayon moyen du moule ou rayon hydraulique du coffrage (induit l'effet de paroi).

A : Paramètre empirique dépendant de la consistance du béton, de l'énergie de mise en œuvre et de la forme géométrique des granulats

Résumé

Résumé :

Cette étude vise à comprendre comment les propriétés géologiques et géotechniques des granulats (graviers et sable) influencent les caractéristiques du béton ordinaire, et à observer leur impact sur sa résistance mécanique.

Dans la région de Saïda, les caractéristiques géologiques des roches exploitées comme granulats, principalement les calcaires et les dolomies, jouent également un rôle important dans la formulation et les performances mécaniques du béton. Les granulats dolomitiques présentent généralement une densité et une résistance à l'écrasement plus élevées que les granulats calcaires, ce qui favorise l'obtention de bétons plus résistants. Par ailleurs, leur texture de surface et leur composition minéralogique peuvent améliorer l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats. Les granulats calcaires, quant à eux, offrent une bonne compatibilité avec le ciment et contribuent à la maniabilité du béton. Ainsi, la nature pétrographique des granulats de la région de Saïda influence directement la qualité du squelette granulaire, la compacité du mélange et, par conséquent, la résistance mécanique finale du béton.

Les résultats de cette étude ont démontré que les granulats ont un effet positif sur l'amélioration et l'augmentation de la résistance du béton. De plus, il est essentiel d'assurer une continuité granulométrique entre les différentes fractions de graviers afin d'obtenir un mélange homogène, exempt de bulles d'air. Cela permet de minimiser les vides dans la structure des granulats, produisant ainsi un béton à haute résistance.

Mots clés :

Granulats ; Béton ; propriétés géotechniques ; Résistance à la compression ; Méthode de FAURY.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى فهم كيفية تأثير الخصائص الجيولوجية والجيوتقنية للحصى على خصائص الخرسانة العادية، وملاحظة تأثيرها على مقاومتها الميكانيكية.

وفي منطقة سعيدة، تلعب الخصائص الجيولوجية للصخور المستغلة والمتمثلة أساسا في الصخور الكلسية والدولوميتية، دورا مهما في تصميم الخلطة الخرسانية وفي أدائها الميكانيكي، فالحصى الدولوميتي يتميز عموما بكثافة ومقاومة للسحق أعلى من الحصى الكلسي، مما يساعد على الحصول على خرسانة ذات مقاومة أكبر. كما أن نسيجه السطحي وتركيبه المعدني يمكن أن يحسن من تماسك العجينة الاسمنتية مع الحصى. أما الحصى الكلسي فيتميز بتوافق جيد مع الاسمنت ويساهم في تحسين قابلية تشغيل الخرسانة وبالتالي، فإن الطبيعة البتروغرافية لحصى منطقة سعيدة تؤثر بشكل مباشر على جودة الهيكل الحبيبي وعلى درجة تراص الخليط، ومن ثم على المقاومة الميكانيكية النهائية للخرسانة.

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن للحصى تأثيرا إيجابيا في تحسين وزيادة مقاومة الخرسانة. كما أن ضمان الاستمرارية التدريجية الحبيبية بين مختلف كسور الحصى يعد أمرا ضروريا للحصول على خليط متجانس وخال من الفجوات الهوائية. ويساهم ذلك في تقليل الفراغات داخل البنية الحبيبية للحصى، مما يؤدي إلى إنتاج خرسانة ذات مقاومة عالية.

الكلمات المفتاحية:

الحصى، الخرسانة، الخصائص الجيوتقنية، مقاومة الضغط، طريقة فوري

Abstract

Abstract :

This study aims to understand how the geological and geotechnical properties of aggregates (gravel and sand) influence the characteristics of ordinary concrete and to investigate their impact on its mechanical strength.

In the Saida region, the geological characteristics of the rocks used as aggregates, mainly limestone and dolomite, also play an important role in concrete mix design and mechanical performance. Dolomitic aggregates generally exhibit higher density and crushing resistance than limestone aggregates, which contributes to the production of stronger concrete. In addition, their surface texture and mineralogical composition can improve the bond between the cement paste and the aggregates. Limestone aggregates, on the other hand, provide good compatibility with cement and contribute to the workability of concrete. Therefore, the petrographic nature of aggregates from the Saida region directly influences the quality of the aggregate skeleton, the compactness of the mix, and consequently the final mechanical strength of the concrete.

The results of this study demonstrated that aggregates have a positive effect on improving and increasing the strength of concrete. Furthermore, it is essential to ensure a continuous gradation between the different gravel fractions in order to obtain a homogeneous mixture free from air voids. This helps minimize voids within the aggregate structure, thereby producing high-strength concrete.

Keywords:

Aggregates; concrete; Geotechnical properties; Compressive strength; Faury Method.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale :

Le présent travail porte sur une étude qualitative de certains granulats concassés provenant de carrières situées dans la région de Saïda, ainsi que sur leur utilisation dans le domaine de la fabrication du béton, en vue de déterminer une composition optimale adaptée à leurs caractéristiques. Les carrières retenues pour cette étude ont été sélectionnées en fonction de leur répartition géographique à l'échelle de la wilaya.

La première partie de ce mémoire est consacrée à une description générale de la région de Saïda, comprenant ses caractéristiques géographiques, géologiques et géomorphologiques, afin de mieux situer le contexte naturel des gisements étudiés.

La deuxième partie présente une série d'analyses physiques et physico-chimiques réalisées en laboratoire sur des échantillons de sable et de gravier prélevés au niveau des trois (03) carrières sélectionnées. Ces analyses visent à déterminer les propriétés essentielles des granulats et à évaluer leur aptitude à être utilisés dans la fabrication du béton.

La troisième partie est dédiée à l'étude des caractéristiques du ciment utilisé dans cette recherche. Elle comprend une étude bibliographique approfondie ainsi qu'un ensemble d'essais expérimentaux destinés à identifier les propriétés physico-chimiques et mécaniques de la pâte de ciment.

Enfin, la dernière partie est consacrée à la proposition d'une formulation optimale du béton, établie à l'aide de la méthode de Faury, suivie d'une analyse et d'une interprétation détaillée des résultats obtenus.

CHAPITRE I

Contexte géologique et géotechnique de la région de Saida

I. Introduction :

Située dans l'Ouest algérien, la wilaya de Saïda présente un contexte naturel marqué par une diversité géographique et géologique notable. Son climat, ses reliefs et la nature de ses formations rocheuses jouent un rôle déterminant dans la genèse et la répartition des matériaux locaux. La région se caractérise notamment par la présence d'importantes formations calcaires et dolomitiques d'âge jurassique et crétacé, à l'origine de nombreux gisements de granulats exploités. La compréhension de ces caractéristiques est essentielle, car elles conditionnent directement les propriétés physiques et mécaniques des matériaux, influençant ainsi leur comportement dans les applications géotechniques et dans la formulation des bétons. [1]

I-1. Généralités :

I-1-1. Présentation géographique et géomorphologique de la région de Saïda :

I-1-1-1. Situation géographique des monts de Saïda:

La wilaya de Saïda, située dans la partie occidentale de l'Algérie, s'inscrit dans un espace de transition entre les zones telliennes du Nord et les hauts plateaux steppiques. Issue du découpage administratif de 1985, elle est limitée au nord par les wilayas de Mascara et Oran, à l'est par Tiaret, à l'ouest par Sidi Bel Abbès, et au sud par El Bayadh et Naâma.

S'étendant sur une superficie d'environ 6 750 km². Elle est organisée administrativement en plusieurs daïras et communes, reflétant une structuration territoriale adaptée aux spécificités géographiques de la région. Sa position géographique stratégique en fait un espace de liaison important entre le nord littoral, les hauts plateaux et le sud-ouest algérien, ce qui lui confère un rôle notable dans le développement des infrastructures de transport et d'aménagement du territoire.

La ville de Saïda est implantée au fond d'une vallée située dans les derniers contreforts tabulaires du versant sud de l'Atlas tellien, formé par les monts de Tlemcen, de Daya et de Saïda. Elle se trouve à la transition entre ces massifs montagneux et les hautes plaines steppiques des Hauts Plateaux.

La wilaya présente un relief contrasté avec une altitude moyenne avoisinant 840 m et des reliefs environnants : Monts de Daya à l'ouest (Sidi Ahmed Zagaie). Montagne de Sidi Abdelkader et les Tétons d'Aïcha au sud, le Monts de Saïda à l'est, notamment le Djebel Tiffrit (1 200 m)

Le couvert forestier de la vallée est estimé à 156 ha ($\approx 23,5$ % de la superficie totale), jouant un rôle dans la stabilisation des pentes et la régulation du ruissellement. Occupation des sols et utilisations :

Nord : terres fertiles favorables aux cultures céréalières et maraîchères, adaptées aux aménagements agricoles et aux infrastructures rurales. Sud : steppes recouvertes d'alfa et d'épineux, formant des pâturages extensifs ($\approx 60\,000$ ha), présentant des sols plus sensibles à l'érosion éolienne et nécessitant une attention particulière pour les projets de terrassement ou de construction. [1]

I-1-2. Ressources hydriques et implications pour l'ingénierie civile :

Le principal cours d'eau est l'oued de Saïda, prenant sa source à environ 1 200 m à 14 km au sud de la ville. Cet oued traverse des gorges rocheuses, appelées Madinet El Ogbane, avant d'atteindre la vallée.

Régime hydrologique : principalement pluvial, avec écoulement permanent tout au long de l'année

Sources secondaires : multiples affluents et sources contribuent à maintenir un débit constant

Ces caractéristiques sont essentielles pour les projets d'ingénierie civile, notamment pour :

La gestion des ressources en eau (réservoirs, stations de traitement, irrigation), le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (ponts, canalisations, drains), la planification urbaine et industrielle en tenant compte du risque d'inondation et de la stabilité des sols.[2]

I-2. Aspect géologique et potentiel minier de la région de Saïda :**I-2-1. Cadre géologies de la région de Saïda :****I-2-1-1. Contexte géologique général :**

Les Monts de Saïda s'inscrivent dans le domaine des Hautes Plaines oranaises, caractérisé par une couverture sédimentaire reposant en discordance sur un socle plissé et érodé. Cette série sédimentaire témoigne d'une évolution géodynamique complexe marquée par des phases de subsidence, de sédimentation marine et de déformation tectonique.[3]

I-2-1-2. Synthèse lithostratigraphique:

La Série stratigraphique de la région de Saïda est dominée par des formations jurassiques, dont les principales unités sont:

a) Le Trias:

Constitué de conglomérats, d'argiles, de pélites et de calcaires dolomitiques, avec des intercalations volcaniques (basaltes et dolérites), le Trias représente la base de la série sédimentaire.

b) Les formations carbonatées jurassiques :

Elles constituent l'essentiel des ressources géologiques de la région:

- Dolomie de Tiffrit : déposée en milieu de plateforme carbonatée interne.
- Marno-calcaires du Djebel Keskes : riches en fossiles (ammonites, brachiopodes).
- Calcaires d'Aïn Balloul : formations pélagiques parfois dolomitisées.
- Dolomies de Saïda : résultant d'une dolomitisation secondaire liée à la tectonique.

Ces formations présentent des caractéristiques pétrographiques favorables à leur utilisation comme granulats.

c) Les formations marno-argileuses :

- **Argiles de Saïda (Callovo-Oxfordien) :** alternance de niveaux marneux et gréseux, largement étendue dans la région.

Ces formations jouent un rôle important dans les propriétés géotechniques des sols.

d) Les formations gréseuses :

- Grès de Sidi Amar : formations épaisses à structures entrecroisées, témoignant d'un environnement de dépôt dynamique.

e) Les formations carbonatées supérieures:

- Dolomies de Tlemcen
- Dolomies de Sidi Boubekeur
- Marno-calcaires de Raouraï

Ces formations complètent la série jurassique et participent fortement au potentiel minier régional.

f) Formations récentes :

- Tertiaire continental : marnes et conglomérats
- Alluvions quaternaires : dépôts récents comblant les vallées [3 ; 4]

I-2-1-3. Particularités géologiques de la région:

La région de Saïda se distingue par:

- **Une** forte dominance des formations carbonatées (calcaires et dolomies)
- **Une** variabilité latérale des faciès liée aux conditions de dépôt
- **Une** influence tectonique importante ayant favorisé la dolomitisation et les discontinuités. [5]

Ces caractéristiques influencent directement la qualité des granulats exploités dans la région.

I-2-2. Potentiel minier de la région de Saïda:**I-2-2-1. Aperçu general:**

La wilaya de Saïda dispose d'un potentiel minier diversifié, mis en évidence par les travaux de prospection géologique. Ce potentiel est réparti sur plusieurs communes et concerne principalement les matériaux de construction et certaines substances industrielles. [5]

I-2-2-2. Ressources en matériaux pour le génie civil:**a) Roches pour agrégats:**

Les calcaires et dolomies jurassiques constituent les principales ressources pour la production de granulats :

- **Calcaires** : présents à Doui Thabet, Hassasna, Sidi Boubekeur, Tircine, Youb, etc.
- **Dolomies** : localisées notamment à Aïn Soltane et Ouled Khaled

Ces matériaux sont largement utilisés dans la fabrication du béton. [6]

b) Matières premières pour l'industrie du ciment:

- Calcaires : exploités pour la production du ciment et de la chaux
- Argiles : utilisées comme correcteurs dans les formulations cimentaires

Ces ressources sont exploitées notamment dans la région de Hassasna. [6]

C) Argiles pour matériaux de construction:

Les argiles de la région sont utilisées dans la fabrication de briques, avec une concentration notable dans les zones nord et nord-ouest.

d) Autres matériaux:

- Sables de construction : ressources limitées
- Tuf : utilisé en travaux publics
- Granite : présent à Tiffrit pour usage décoratif

I-2-2-3. Indices métallifères:

La région présente également des indices de minéralisation métallique :

- Or et cuivre (région de Tiffrit)
- Plomb et zinc (Maamora – Djebel Sidi Youcef)

Ces indices sont encore peu exploités mais témoignent d'un potentiel minier supplémentaire. [6, 7]

Afin de mieux comprendre le potentiel géologique et minier de la wilaya de Saïda, les trois figures suivantes présentent une vue d'ensemble des principales caractéristiques du sous-sol régional. D'abord on trouve la **Figure I- 1** : la carte de répartition des carrières et gisements qui localise les principaux sites d'exploitation des matériaux de construction et des ressources minérales, tandis que la **Figure I- 2**: la carte des ressources minières qui illustre la diversité des substances minérales identifiées et enfin on trouve la **Figure I- 3**: la carte géologique qui met en évidence la répartition des différentes formations lithologiques qui constituent le cadre géologique de la région. L'analyse conjointe de ces documents permet de mettre en évidence la relation étroite entre la géologie régionale, la distribution des ressources minérales et leur valorisation dans les domaines du génie civil, des travaux publics et du développement industriel.

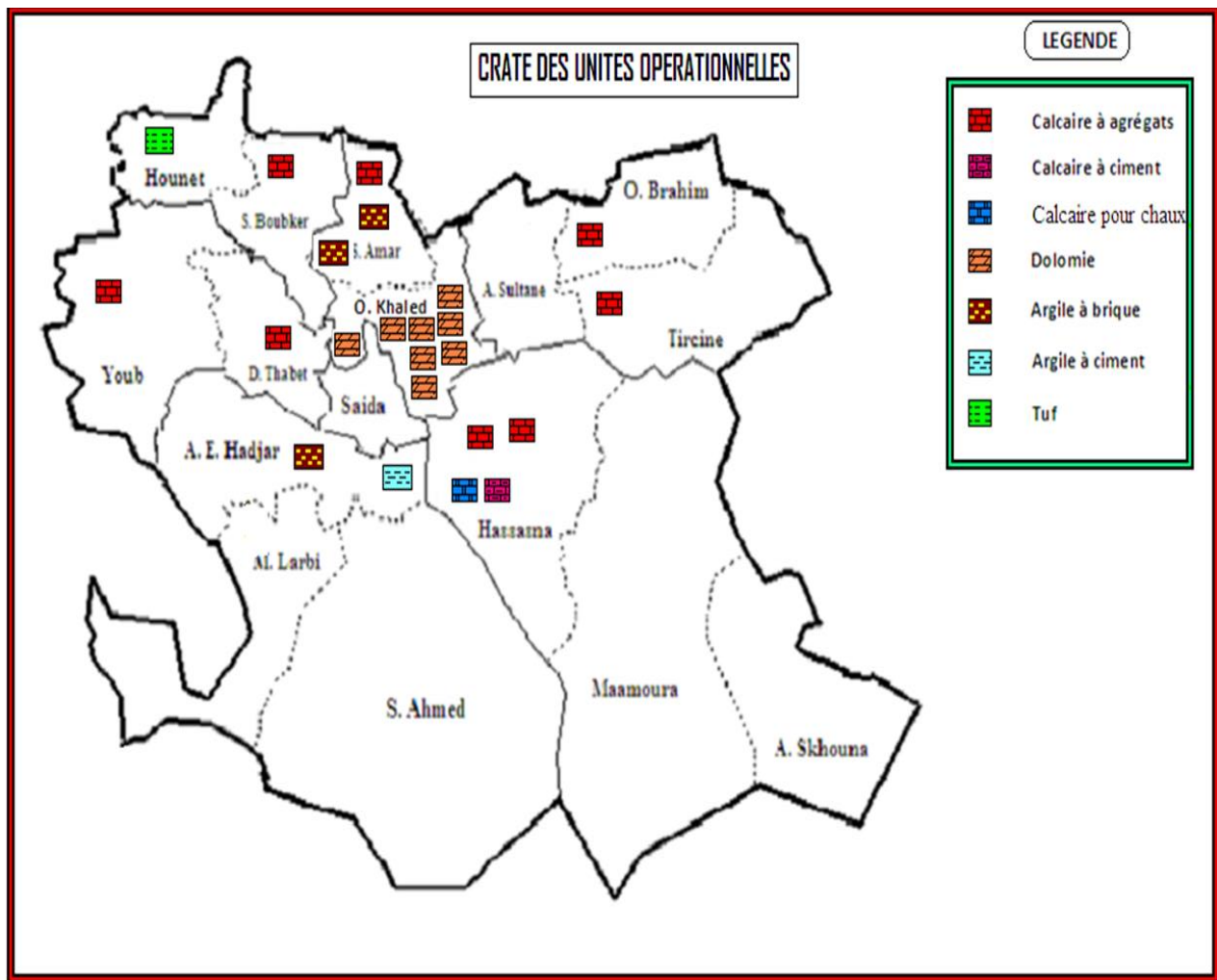


Figure I- 1 : Répartition des carrières et gisements dans la wilaya de Saïda [6]

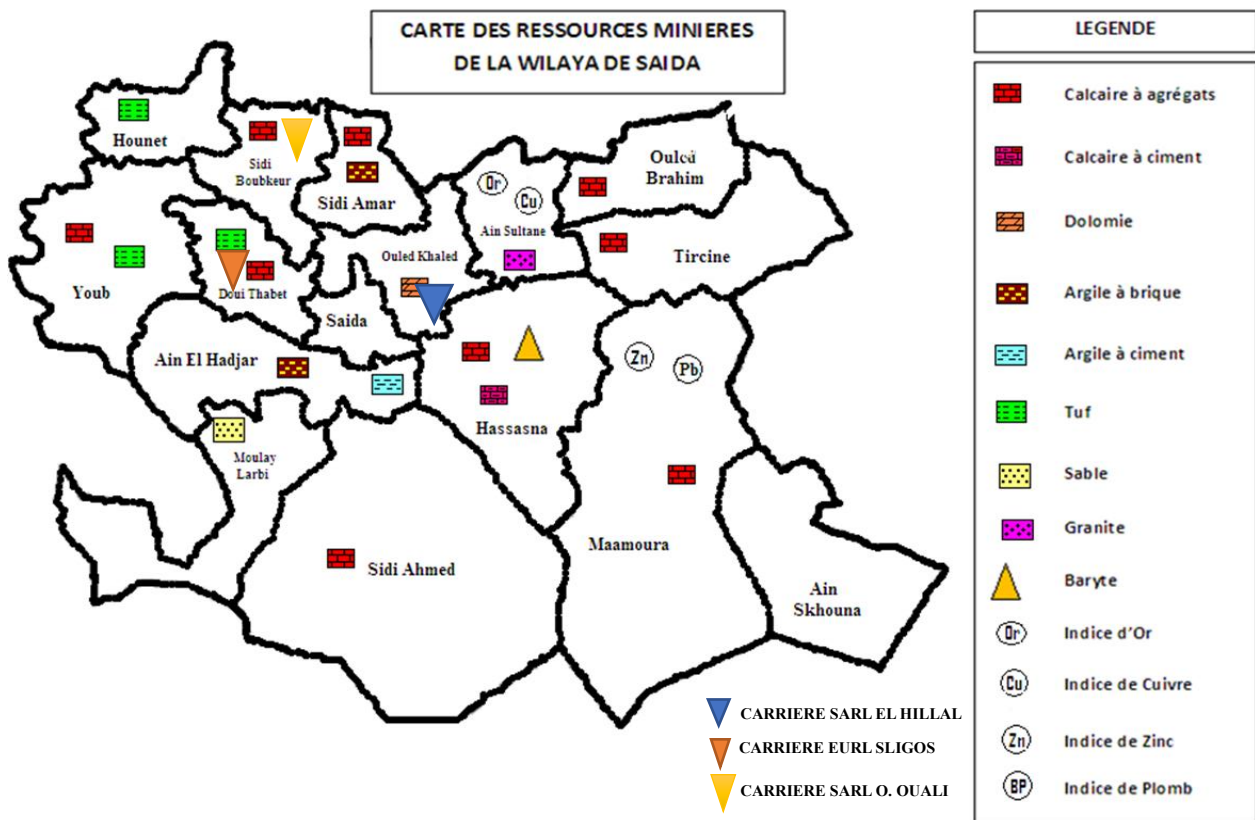


Figure I-2 : Carte des ressources minières de la région de Saïda [6]

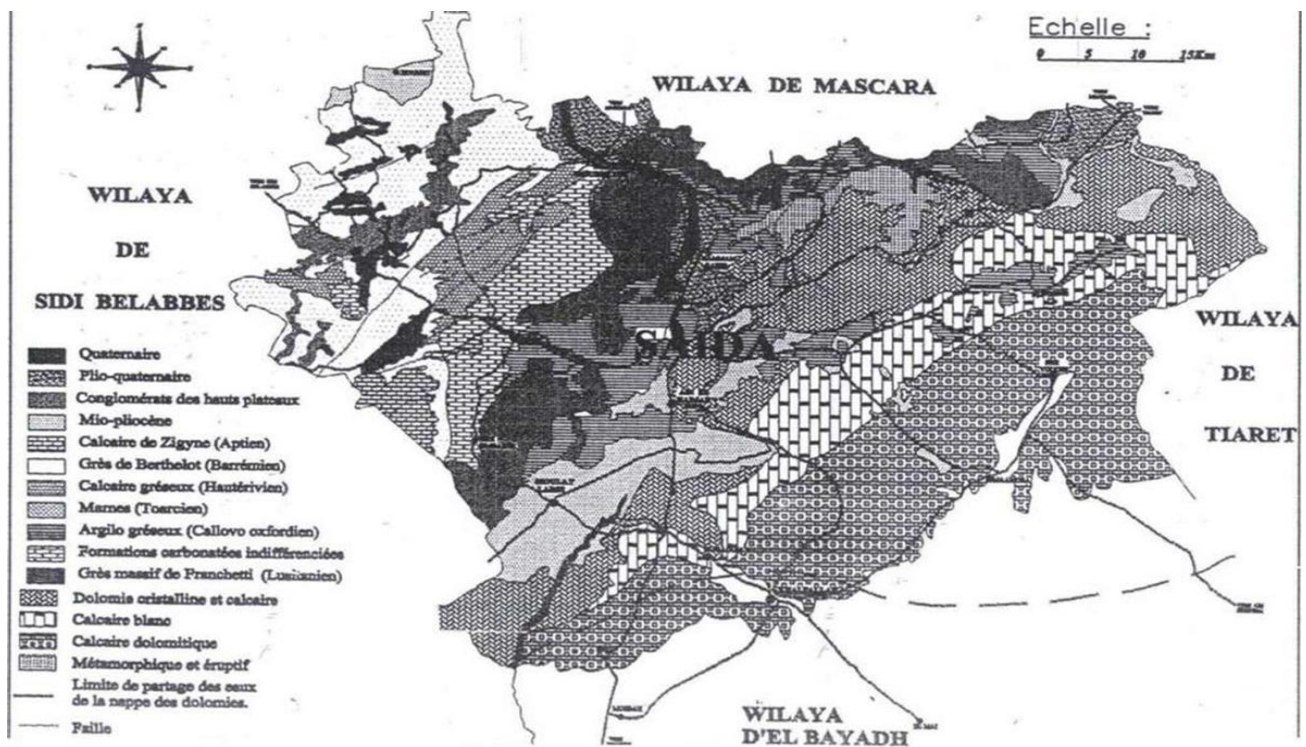
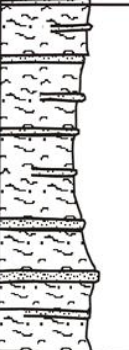


Figure I- 3 : Carte géologique simplifiée de la région de Saïda [6]

Le **tableau I-1** présente la colonne lithostratigraphique des Monts de Saïda, mettant en évidence la succession des formations géologiques qui composent le sous-sol régional. Cette représentation permet d'appréhender la nature et la répartition des différents horizons lithologiques, dont les propriétés influencent directement les caractéristiques géotechniques des terrains ainsi que la disponibilité des matériaux utilisés dans les travaux de génie civil.

Tableau I- 1 : Colonne litho stratigraphique des Monts de Saïda [6]

Âge		Log	Épai	Description lithologique
Quaternaire			20 m	Limons plus ou moins schisteux et travertins
Tertiaire			75 m	Argiles briques sableux ou gypseuses intercalés de calcaires et de graviers ou galets
Crétacé	Sénonien		100 m	Calcaires gris claires à pâte fine très altérée à la partie superficielle
	Barrémien		30 à 40 m	“ Grès de Youb”(ex. Berthelot)
JURASSIQUE	Kimméridgien		30 m	Dolomies de Sidi Boubekeur Marno-calcaires de Raourai Calcaires de Stah Dolomies de Tlemcen Calcaires de Zarifet
	Lusitanien		180 m	“ Grès de Sidi Amar” (ex. Franchitti). Équivalents des “ Grès de Boumédienne” avec de rares passées carbonatées et des argiles sableuses. Ils présentent une stratification entrecoupée.
	Callovo-oxfordien		180 à 350 m	“ Argiles de Saïda”:puissante série argilo-gréseuse à dominance argileuse avec des passées calcaires
	Aaléno-bajo-bathonien		110 à 150 m	“ Dolomies supérieures” ou “ Calcaires de Balloul”; Dolomies cristallines et calcaires fissurés
	Toarcien		15 à 25 m	“ Marno-calcaires de Keskes”
	Domérien		30 à 50 m	“ Dolomies de Tffrit” ou “ Dolomies inférieures” Dolomies cristallines bréchiques avec argiles
	Trias			Argiles salines grès argileux basalte
Primaire				Schistes-granite-rhyolites-diorites

I-2-2-4. Présentation des unités minières opérationnelles de la région de SAIDA :

Sur la base des données techniques recueillies auprès des services des mines de la wilaya de Saïda, un inventaire des principales carrières en exploitation dans la région a été établi. Cet inventaire permet d'identifier la nature des ressources minérales disponibles, leurs localisations, ainsi que les durées de validité des titres miniers associés.

Les informations collectées ont été synthétisées dans le tableau suivant, qui présente les différents exploitants, les sites d'extraction, les substances exploitées et leurs principaux domaines d'utilisation. Ces ressources minérales jouent un rôle fondamental dans l'approvisionnement de plusieurs secteurs industriels, notamment celui du bâtiment et des travaux publics (BTP), en fournissant des matières premières essentielles telles que les granulats, le ciment, la chaux, les briques et les pierres de construction.

La répartition des sites proposés s'effectue en fonction de leur statut d'exploitation comme suit :

- Huit (08) sites destinés aux travaux d'exploration minière, pour une durée prévisionnelle de trois (03) ans, dans l'objectif d'évaluer les caractéristiques géologiques des gisements ainsi que leurs potentialités exploitables ;
- Cinq (05) sites affectés à l'exploitation directe, destinés à la production effective de matériaux minéraux ;

Tableau I-2-a : tableau représentatif du potentiel minier de la région de Saïda (carrière à agrégats) [6]

N°	Exploitant	Lieu-Dit	Matière	Utilisation	Observation
01	EURL S.L.I.G.O. S	Merdja01	Calcaire	Agrégats	En Activité
02	EURL El Hachemi	Belftough	Calcaire	Agrégats	En Activité
03	SARL Ould Ouali	Djebel Messaoud	Calcaire	Agrégats	En Activité
04	EURL Chohra Larab	Mosbah	Calcaire	Agrégats	En Activité
05	ETP Baghdad Belaid	Belftough01	Calcaire	Agrégats	En Activité
06	ETP Youcef Achira	Belftough02	Calcaire	Agrégats	En Activité
07	SARL Al Hillal	EL Aoudja	Dolomie	Agrégats	En Activité
08	SNC Zouaoui Lamri	Biaza 01	Calcaire	Agrégats	En Activité



Figure II-4 : Photo n°01 concasseur de la carrière SARL O. OUALI de sidi boubker



Figure II-5 : Photo n°02 concasseur de la carrière EURL S.L.I.G.O.S de ELMERDJA



Figure II-6 : Photo n°03 concasseur de la carrière SARL EL. HILAL d'AIN ZARGGA

Tableau I - 2-b : tableau représentatif du potentiel minier de la région de Saïda (carrière à matériaux minéraux) [6]

N°	Exploitant	Lieu-Dit	Matière	Utilisation	Observation
01	S.CI. S	Hassasna	Calcaire	Ciment	En Activité
02	S.CI. S	Kodiet Tine	Argile	Ciment	En Activité
03	SARL BMSD	Sidi Aissa	Argile	Briques	En Activité
04	SARL BMSD	Ben Adouane	Argile	Briques	En Activité
05	SARL BMSD	Hassasna	Calcaire	Chaux	En Activité

I-3. Conclusion :

À l'issue de cet aperçu géologique, il est possible d'évaluer de manière globale le potentiel local en gisements de carrières et d'apprécier la disponibilité des matériaux susceptibles d'être utilisés dans les travaux de génie civil. Cette analyse constitue une étape fondamentale pour l'identification des sources d'approvisionnement en matériaux de construction nécessaires à la réalisation des projets d'infrastructures.

Par ailleurs, cette étude préliminaire permet de procéder à une sélection rationnelle des carrières les mieux adaptées aux besoins de l'étude, en se basant sur des critères techniques et logistiques bien définis. Parmi ces critères figurent notamment l'accessibilité des sites d'exploitation, les conditions de sécurité liées aux activités extractives, ainsi que la proximité des carrières par rapport à la zone du projet. L'ensemble de ces paramètres contribue à optimiser les conditions d'approvisionnement en matériaux, à réduire les coûts de transport et à améliorer l'efficacité globale des opérations de construction.

Chapitre II

ANALYSE D'IDENTIFICATION DES CARRIERES LOCALES

II. Introduction :

Dans le domaine du génie civil, les granulats jouent un rôle essentiel dans la fabrication des matériaux de construction, tels que le mortier et le béton. Ces matériaux résultent de l'association de particules minérales avec un liant (ciment, chaux ou autre liant hydraulique), formant ainsi des composites aux propriétés mécaniques adaptées aux exigences des structures.

Les granulats constituent la majeure partie de ces mélanges, pouvant représenter jusqu'à 80 % de la masse totale du béton. À ce titre, leur qualité et leurs caractéristiques influencent directement les performances finales des ouvrages, notamment en termes de résistance, de durabilité et de stabilité. Par ailleurs, leur utilisation permet de réduire la quantité de liant nécessaire, contribuant ainsi à l'optimisation économique des matériaux.

Compte tenu de leur importance, il est indispensable de bien connaître leurs propriétés à travers des essais de laboratoire. Ces essais nécessitent toutefois un échantillonnage rigoureux, afin de garantir la représentativité des résultats et d'éviter toute erreur d'interprétation pouvant compromettre la qualité des ouvrages.

II.1. Généralités sur les granulats :

Les granulats sont définis comme un ensemble de particules minérales inertes, telles que les sables, les graviers et les cailloux, utilisées en association avec un liant pour la fabrication de matériaux de construction.

Il convient de distinguer clairement le terme « **granulat** » de celui d'« **agrégat** » :

- **Un agrégat** : désigne un assemblage de plusieurs éléments solidement liés entre eux (comme le béton durci).
- **Les granulats** : correspondent à un ensemble de grains indépendants, pouvant présenter différentes dimensions et caractéristiques.

Du point de vue technique, les granulats constituent le squelette granulaire du béton. Leurs propriétés physiques, mécaniques et géométriques influencent fortement le comportement du matériau final. Ils contribuent notamment à :

- **Améliorer** la résistance mécanique du béton ;
- **Limiter** les phénomènes de retrait et de fluage ;
- **Assurer** une meilleure stabilité dimensionnelle.

Note : En général, les granulats présentent une résistance supérieure à celle de la pâte de ciment durcie, ce qui explique leur rôle déterminant dans la performance globale et la durabilité du béton.

Cependant, leur utilisation doit respecter certaines conditions essentielles :

- **Conformité aux normes** : Les granulats doivent répondre aux exigences des normes en vigueur (propreté, résistance, durabilité).
- **Dosage optimal en liant** : La quantité de liant doit être suffisante pour assurer un bon enrobage des grains et combler les vides, garantissant ainsi la compacité et la cohésion du mélange.

Enfin, les essais de caractérisation des granulats, réalisés sur des échantillons de taille limitée, doivent impérativement être effectués sur des prélèvements représentatifs. L'échantillonnage constitue donc une étape cruciale : une mauvaise représentativité peut entraîner des résultats erronés et affecter la qualité des études ainsi que celle des ouvrages réalisés.

II.2. Présentation des granulats étudiés :

Les carrières prises en considération dans cette étude sont situées autour de la ville de Saïda, précisément à :

- Sidi Boubkeur : Carrière Sarl Ould Ouali, sise à Djebel Messaoud.
- Ain Zergga : Carrière Sarl El Hillal, sise à El Aoudja.
- EL Fidjel : Carrière Eurl S.L.I.G.O.S, sise à El Merdja.

L'analyse cartographique de la wilaya de Saïda montre que la répartition des carrières de granulats destinées à la construction n'est pas homogène sur l'ensemble du territoire. Cette distribution inégale entraîne une disponibilité limitée des matériaux, bien que leur coût demeure relativement modéré.

Les granulats étudiés proviennent du concassage de roches naturelles d'origines géologiques diverses. L'objectif de cette étude est de caractériser ces granulats en réalisant une analyse physique et mécanique complète, afin d'évaluer leur aptitude à être utilisés dans les travaux de génie civil.

Cette caractérisation permettra notamment :

1. De déterminer leur performance dans la fabrication du béton, des mortiers ou des enrobés bitumineux ;
2. D'optimiser leur utilisation en fonction des exigences techniques et économiques des projets de construction.

II.3. Prélèvement d'échantillons :

II.3.1. Définition de l'échantillonnage :

L'échantillonnage des granulats consiste à prélever une portion représentative du matériau afin de caractériser l'ensemble du stock disponible. Cette étape constitue un enjeu fondamental dans l'étude des granulats, car tous les résultats expérimentaux obtenus en laboratoire dépendent directement de la représentativité de l'échantillon prélevé.

Le défi majeur : La principale difficulté réside dans le fait que l'échantillon doit refléter fidèlement la variabilité du matériau, tant sur le plan de la granulométrie que des propriétés physiques et mécaniques.

Un échantillonnage inadéquat peut introduire des biais importants et compromettre la fiabilité des analyses. Pour limiter ces risques, il est impératif de procéder au prélèvement des échantillons selon des méthodes rigoureuses et standardisées, permettant de garantir que la quantité prélevée et la manière dont elle est sélectionnée représentent au mieux le matériau d'origine. Cette démarche

assure la validité des essais ultérieurs et la pertinence des conclusions techniques pour l'application des granulats dans les ouvrages de génie civil.



Figure II-1 : échantillonnage du gravier (carrière EURL S.L.I.G.O.S)

II.3.2. Les phases de l'échantillonnage :

Le prélèvement d'échantillons de granulats se déroule généralement en deux étapes principales, afin de garantir la représentativité du matériau étudié et la fiabilité des résultats expérimentaux :

1. **Prélèvement sur le chantier, dans la carrière ou à l'usine :** À cette étape, une quantité de matériau supérieure à celle nécessaire pour les essais en laboratoire est prélevée. L'objectif est de constituer un **échantillon primaire** représentatif de l'ensemble du stock disponible.
2. **Prélèvement en laboratoire :** À partir de l'échantillon primaire, la quantité exacte nécessaire pour chaque essai est sélectionnée. Cette opération doit également respecter les principes de représentativité afin que les propriétés mesurées correspondent à celles du matériau initial.

II.3.2.1. Prélèvement sur tas normaux :

Selon la nature et la granulométrie des matériaux, plusieurs méthodes de prélèvement peuvent être utilisées :

- **À la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique :** Cette méthode est adaptée aux granulats fins ou moyens disposés en tas réguliers.
- **À la main, par ratissage dans un récipient :** Technique principalement utilisée pour les éléments grossiers, tels que les graviers concassés.
- **Au moyen d'une sonde :** La sonde utilisée doit présenter des caractéristiques spécifiques pour garantir l'homogénéité :
 - Un diamètre de **4 à 6 cm** ;
 - Une longueur comprise entre **60 et 100 cm** ;

- Une extrémité taillée en **sifflot** pour faciliter l'insertion dans le tas et assurer un prélèvement homogène.

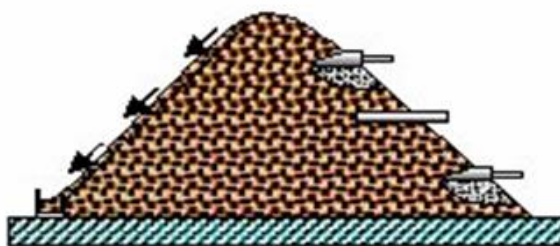


Figure II-2 : les matériaux en stock

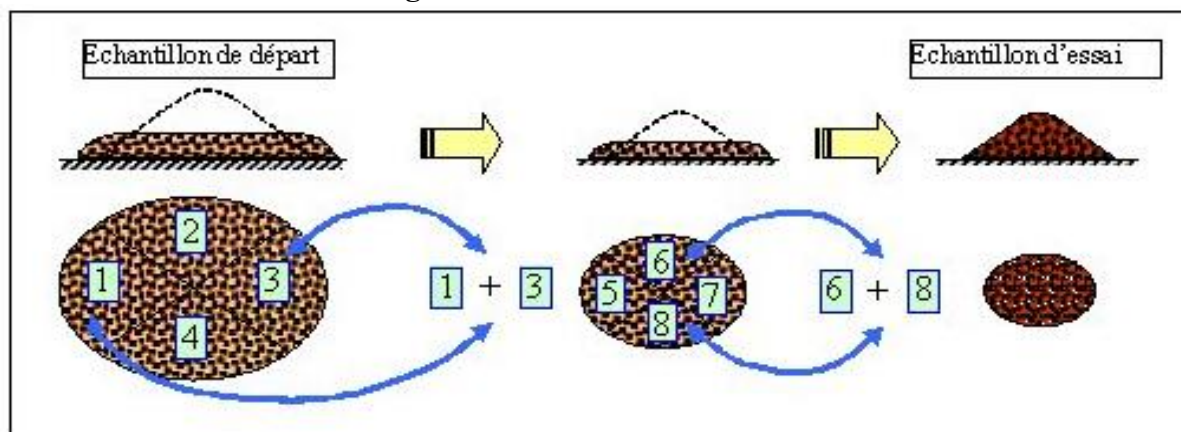


Figure II-3 : Opération de quartage

II.3.2.2. Échantillonneur :

L'échantillonneur (fig. II.4) est un dispositif de laboratoire utilisé pour diviser un échantillon global en deux fractions représentatives de manière simple et fiable. Chaque fraction obtenue est recueillie séparément dans un bac distinct. La répétition successive de cette opération, en conservant à chaque étape le contenu de l'un des bacs, permet de réduire progressivement la quantité de matériau. Après trois à quatre divisions successives, il est possible d'obtenir un échantillon de masse appropriée, tout en préservant sa représentativité vis-à-vis de l'échantillon initial.

Figure II-4 : Échantillonneur



II.4. Représentation des carrières visitées :

Les informations collectionnées sur les différentes carrières visitées, sont résumées dans le tableau II.1

Tableau II.1 : Carrières visitées

N°	Carrières	Date de prélèvement	Site d'implantation	Statut
1	SARL O. OUALI	02/02/2026	SIDI BOUBEKEUR	Privé
2	EUURL S.L.I.G.O.S	02/02/2026	MERDJA	Privé
3	SARL EL HILLAL	02/02/2026	AIN ZERGGA	Privé

II.5. Essais réalisés sur les granulats (sables et graviers) :

II.5.1. Propriétés dimensionnelles :

II.5.1.1. Analyse granulométrique par voie sèche :

L'analyse granulométrique constitue un essai essentiel visant à caractériser les dimensions des particules ainsi que les proportions massiques des différentes classes granulaires composant un échantillon. Elle est applicable à l'ensemble des granulats dont la dimension nominale maximale est inférieure ou égale à 63 mm, à l'exception des fillers qui nécessitent des méthodes spécifiques. Il est important de ne pas confondre les notions de granulométrie et de granularité. La granulométrie se rapporte à l'identification des dimensions des grains, tandis que la granularité désigne la distribution des tailles des particules au sein d'un granulat donné.



Figure II.5: Tamiseuse électrique et les tamis

Afin d'éviter toute ambiguïté, un tamis et une passoire équivalents ont été désignés par un même numéro de module. Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement, sont les suivantes

Tableau II.2: Dimensions nominales des tamis

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis (mm)	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

a) Préparation de l'échantillon :

La préparation de l'échantillon constitue une phase déterminante de l'essai granulométrique, car elle doit répondre à des exigences techniques parfois contradictoires. En effet, la masse prélevée doit être suffisamment importante afin de garantir la représentativité de l'échantillon vis-à-vis du matériau d'origine. Toutefois, elle doit également rester modérée afin de limiter la durée de l'essai et d'éviter l'encombrement ou la saturation des tamis, ce qui pourrait altérer la qualité du tamisage et la précision des résultats. En pratique, la masse de l'échantillon à analyser est généralement déterminée en fonction de la dimension maximale des granulats conformément aux prescriptions de la norme NF EN 933-1. Elle peut être estimée à l'aide de la relation empirique suivante : $M = 0,2 D$ où M désigne la masse de l'échantillon exprimée en kilogrammes (kg), et D correspond au diamètre maximal du plus gros granulats, exprimé en millimètres (mm). [12]

b) Description de l'essai : (Procédure de tamisage)

1. Préparation de l'échantillon :

- Sécher le matériau à l'étuve à une température maximale de **105 °C**.
- S'assurer que toute humidité est éliminée afin de ne pas fausser les résultats.

2. Montage de la colonne de tamis :

- Disposer les tamis en colonne, emboîtés les uns sur les autres.
- Organiser les tamis de manière à ce que :
 - Les ouvertures les plus grandes soient en haut.
 - Les ouvertures les plus petites soient en bas.
- Placer un fond étanche à la base pour recueillir les particules fines (fillers).
- Installer un couvercle au sommet pour éviter toute perte de matériau.

3. Réalisation du tamisage :

- Introduire le matériau dans le tamis supérieur.
- Soumettre la colonne de tamis à des vibrations mécaniques à l'aide d'une tamiseuse électrique.
- Adapter la durée du tamisage en fonction :
 - Du type d'appareil,
 - De la masse de l'échantillon,
 - De la taille des ouvertures des tamis.
- Effectuer un étalonnage préalable de la machine pour garantir la reproductibilité des résultats.

4. Critère de fin de tamisage :

- Considérer le tamisage terminé lorsque la variation des refus entre deux cycles successifs est inférieure ou égale à 1 %.

5. Définitions importantes :

- **Tamisât** : masse de matériau qui traverse un tamis.
- **Refus** : masse de matériau retenue sur un tamis.

6. Mesures finales

- Mesurer la masse du refus sur le tamis ayant la plus grande ouverture.
- Noter cette masse R_1 , correspondant au matériau retenu sur le premier tamis.

7. Mesures cumulées des refus

- Après avoir mesuré R_1 (refus du tamis de plus grande ouverture) :
 - Mesurer le refus du tamis immédiatement inférieur.
 - Additionner cette masse avec R_1 .
 - Noter la masse cumulée obtenue R_2 .
- Répéter cette opération pour chaque tamis, en suivant l'ordre des ouvertures décroissantes.
- Noter chaque masse cumulée sous la forme R_n , correspondant à la somme des refus jusqu'au tamis considéré.

Remarque : Cette méthode permet d'obtenir la distribution granulométrique cumulative du matériau.

II.5.1.2. Résultats de la granulométrie des carrières visitées :

Les tableaux ci-après présentent les résultats des analyses granulométriques réalisées sur les granulats et les sables provenant de trois carrières de la wilaya de Saïda : Sidi Boubkeur, El Merdja et Aïn El Zerga.

Pour chaque carrière, une étude granulométrique complète a été effectuée sur différentes classes de matériaux, notamment les fractions 3/8 mm, 8/15 mm ainsi que le sable 0/3 mm. Ces analyses ont été menées afin de déterminer la répartition dimensionnelle des grains et d'évaluer la conformité

des matériaux aux exigences utilisées dans les applications géotechniques et la formulation des bétons.

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux suivants, accompagnés des courbes granulométriques correspondantes. Ces courbes permettent de visualiser la distribution des particules selon leur taille et de comparer le comportement granulométrique des matériaux issus des différentes carrières. Elles constituent également un outil essentiel pour apprécier l'homogénéité des granulats, leur qualité ainsi que leur aptitude à être utilisés dans les travaux de construction et de génie civil.

Tableau II.3 : représentants les valeurs des dimensions d'un gravier 8/15 de la carrière de SARL O. OUALI (Sidi boubker)

- Passer M = 4000g [12]
- Laver M sur tamis de 0.08 mm
- secher le refuse jusqu'à masse constant
- Passer le refuse Ms = 3985.27g
- procéder au tamisage et remplir le tableau ci-après :

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus cumulés Ri en (g)	Refus cumulé en (%) Ri /M*100	Tamisats cumulé en 100-(Ri /M) (%)
40	-	-	-
31.5	-	-	-
25	-	-	-
20	-	-	100
16	268.46	6.23	93.76
12.5	2946.98	73.67	26.32
10	3718.12	92.95	7.05
8	3943.88	98.59	1.40
6.3	3968.11	99.20	0.80
5	-	-	-
2.5	-	-	-
1.25	-	-	-
0.63	-	-	-
0.315	-	-	-
0.16	-	-	-
0.08	-	-	-
	Rn=6.19		
	Passant au dernier tamis Tn =3968.11		
	Rn + Tn =3974.30		
	(Ms-(Rn+Tn)/Ms)*100 =0.27 < 2%		

**Tableau II.4 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 3/8 de la carrière de SARL
O. OUILI (Sidi boubker)**

- Passer M =3000g [12]
- Laver M sur tamis de 0.08 mm
- secher le refus jusqu'à masse constant
- Passer le refus Ms = 2975.80g
- procéder au tamisage et remplir et tableau ci-après :

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus cumulés Ri en (g)	Refus cumulé en (%) Ri /M*100	Tamisats cumulé en 100-(Ri /M*100) (%)
40	-	-	-
31.5	-	-	-
25	-	-	-
20	-	-	-
16	-	-	-
12.5	-	-	-
10	-	-	-
8	-	-	100
6.3	314.32	10.47	89.52
5	1394.84	46.49	53.50
2.5	2933.37	98.78	1.22
1.25	-	-	-
0.63	-	-	-
0.315	-	-	-
0.16	-	-	-
0.08	-	-	-
	Rn=10.80		
Passant au dernier tamis Tn =2963.37			
Rn + Tn =2974.17			
$(Ms-(Rn+Tn)/Ms)*100 =0.054 < 2\%$			

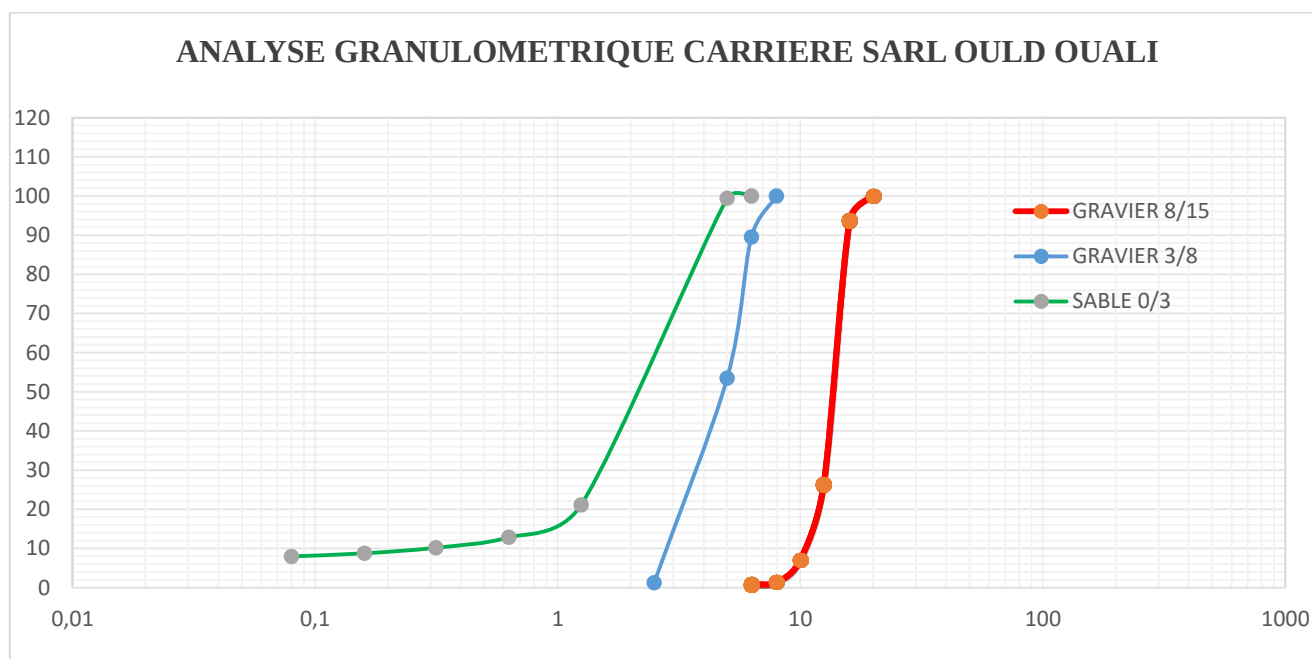
Tableau II.5 : représentant les valeurs des dimensions d'un sable 0/3 de la carrière de SARL**O. OUALI (Sidi boubker)**

- Passer M =1000g [12]
- Laver M sur tamis de 0.08 mm
- secher le refus jusqu'à masse constant
- Passer le refuse Ms = 921.88g
- procéder au tamisage et remplir et tableau ci-après :

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus cumulés Ri en (g)	Refus cumulé en (%) $Ri / M * 100$	Tamisats cumulé en $100 - (Ri / M * 100)$ (%)
40	-	-	-
31.5	-	-	-
25	-	-	-
20	-	-	-
16	-	-	-
12.5	-	-	-
10	-	-	-
8	-	-	-
6.3	-	-	100
5	5.89	0.589	99.41
1.25	788.79	78.88	21.12
0.63	871.44	87.14	12.86
0.315	898.34	89.83	10.17
0.16	912.50	91.25	8.75
0.08	920.41	92.04	7.96
Rn=0.15			
Passant au dernier tamis Tn =920.41			
Rn + Tn =920.56			
$(Ms - (Rn + Tn) / Ms) * 100 = 0.14 < 2\%$			

a). Présentation des résultats :

Les courbes granulométriques des graviers 8/15, 3/8 et sable 0/3 prélevés de la carrière SARL OULD OUALI sont représentés ci-dessous :



b) Interprétation des résultats :

Analyse des courbes granulométriques – Carrière SARL Ould Ouali :

L'analyse granulométrique des matériaux de la carrière SARL Ould Ouali met en évidence trois fractions granulaires distinctes : le sable 0/3, le gravier 3/8 et le gravier 8/15.

Sable 0/3 : La courbe présente une répartition relativement étalée des particules fines. On observe une augmentation progressive du pourcentage passant jusqu'à environ 3 à 5 mm, traduisant une bonne diversité des dimensions des grains au sein de cette fraction.

Gravier 3/8 : La courbe est plus inclinée et concentrée dans l'intervalle 3 à 8 mm. Cette pente relativement forte indique une granulométrie assez uniforme avec une faible dispersion des dimensions des particules.

Gravier 8/15 : La courbe est très raide et se situe principalement entre 8 mm et 15 mm, ce qui caractérise une fraction grossière homogène et peu étalée.

Observations générales :

Les trois courbes sont bien individualisées et couvrent l'ensemble des dimensions recherchées. Cependant, un **léger manque de particules intermédiaires** est observable entre les fractions 0/3 et 3/8, ainsi qu'entre les fractions 3/8 et 8/15. Ces discontinuités restent modérées mais peuvent entraîner une augmentation du volume des vides dans un mélange non optimisé.

Par ailleurs, la courbe du sable 0/3 montre une proportion relativement faible de très fines particules ($< 0,2$ mm), ce qui peut limiter les risques d'excès de fines tout en conservant une bonne aptitude au compactage.

Conclusion :

Les matériaux de la carrière SARL Ould Ouali présentent une granulométrie globalement satisfaisante et conforme aux classes 0/3, 3/8 et 8/15. Les courbes témoignent d'une bonne homogénéité des granulats. Néanmoins, l'existence de faibles discontinuités entre certaines fractions suggère qu'une optimisation du dosage des différentes classes granulaires pourrait améliorer la compacité du mélange et réduire le volume des vides.

**Tableau II-6 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 8/15 de la carrière EURL.
S.L.I.G.O.S (merdja)**

- Passer M =4000g... [12]
- Laver M sur tamis de 0.08 mm
- secher le refus jusqu'à masse constant
- Passer le refus Ms = 3978.91g
- procéder au tamisage et remplir et tableau ci-après :

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus cumulés Ri en (g)	Refus cumulé en (%) Ri /M*100	Tamisats cumulé en 100-(Ri /M*100) (%)
40	-	-	-
31.5	-	-	-
25	-	-	-
20	-	-	100
16	153.33	3.85	96.14
12.5	2009.68	50.50	49.49
10	3281.71	82.47	17.52
8	3818.59	95.97	4.02
6.3	3937.23	98.95	1.04
5	3949.52	99.26	0.73
2.5	-	-	-
1.25	-	-	-
0.63	-	-	-
0.315	-	-	-
0.16	-	-	-
0.08	-	-	-
	Rn=25.92		
Passant au dernier tamis Tn =3949.52			
Rn + Tn =3975.44			
(Ms-(Rn+Tn)/Ms)*100 =0.087 < 2%			

**Tableau II-7 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 3/8 de la carrière de
EURL.S.L.I.G.O. S (merdja)**

-Passer M =3000g... [12]

-Laver M sur tamis de 0.08 mm

-secher le refus jusqu'à masse constant

- Passer le refus Ms = 2946.39g

-procéder au tamisage et remplir et tableau ci-après :

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus cumulés Ri en (g)	Refus cumulé en (%) $R_i / M * 100$	Tamisats cumulé en $100 - (R_i / M * 100)$ (%)
40	-	-	-
31.5	-	-	-
25	-	-	-
20	-	-	-
16	-	-	-
12.5	-	-	100
10	8.79	0.298	99.70
8	15.82	0.53	99.46
6.3	174.62	5.92	94.07
5	648.24	22.00	77.99
2.5	2603.05	88.34	11.65
1.25	2926.24	97.54	2.46
0.63	-	-	-
0.315	-	-	-
0.16	-	-	-
0.08	-	-	-
	Rn=14.58		
Passant au dernier tamis Tn =2926.24			
Rn + Tn =2940.82			
$(M_s - (R_n + T_n) / M_s) * 100 = 0.189 < 2\%$			

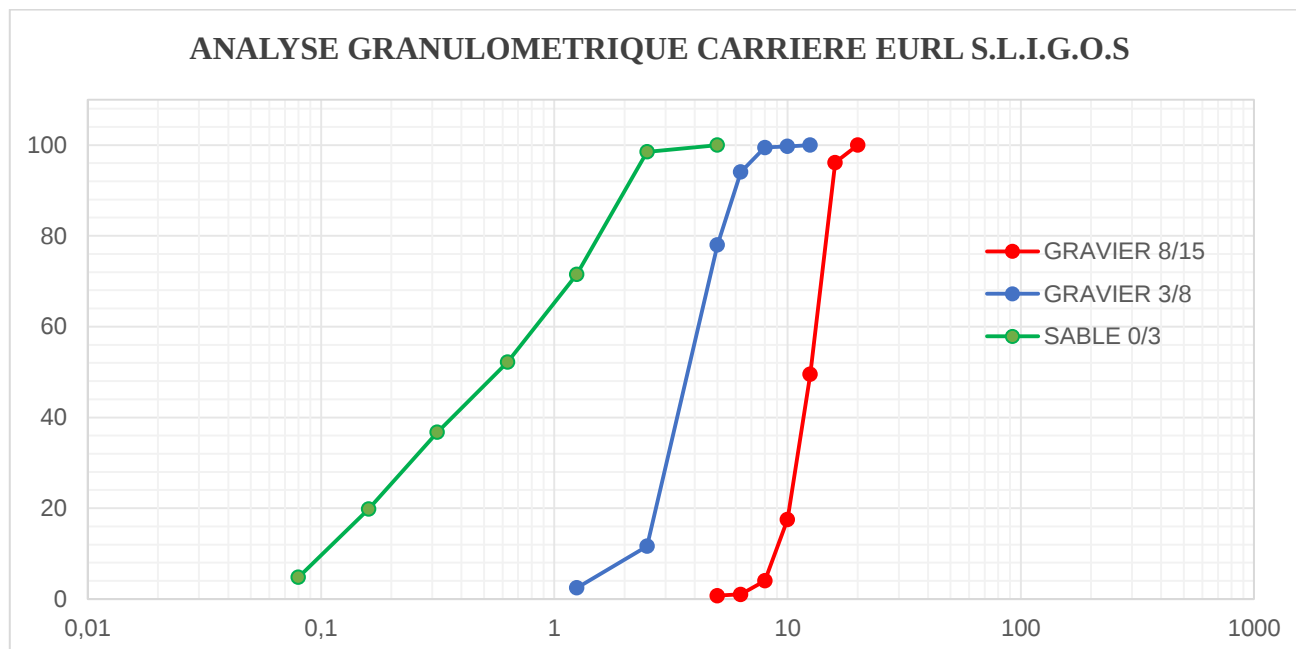
Tableau II-8 : représentant les valeurs des dimensions d'un sable 0/3 de la carrière de EURL.S.L.I.G.O. S (merdja)

- Passer M =1000g... [12]
- Laver M sur tamis de 0.08 mm
- secher le refus jusqu'à masse constant
- Passer le refus Ms = 825.19g
- procéder au tamisage et remplir et tableau ci-après :

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus cumulés Ri en (g)	Refus cumulé en (%) $R_i / M * 100$	Tamisats cumulé en $100 - (R_i / M * 100)$ (%)
40	-	-	-
31.5	-	-	-
25	-	-	-
20	-	-	-
16	-	-	-
12.5	-	-	-
10	-	-	-
8	-	-	-
6.3	-	-	-
5	-	-	100
2.5	12.28	1.48	98.51
1.25	234.75	28.44	71.55
0.63	394.65	47.82	52.17
0.315	522.09	63.26	36.73
0.16	661.59	80.17	19.82
0.08	785.54	95.19	4.80
	Rn=36.68		
Passant au dernier tamis Tn =785.54			
Rn + Tn =822.22			
$(Ms - (Rn + Tn) / Ms) * 100 = 0.399 < 2\%$			

a) Présentation des résultats :

Les courbes granulométriques des différentes carrières visitées sont représentés ci-dessous, avec :



b) Interprétation des résultats :

Analyse des courbes granulométriques :

L'analyse granulométrique des matériaux provenant de la carrière EURL S.L.I.G.O.S met en évidence trois classes granulaires distinctes : le sable 0/3, le gravier 3/8 et le gravier 8/15.

- **Sable 0/3** : La courbe présente une répartition continue des particules fines entre environ 0,08 mm et 3 mm. La pente relativement régulière indique une granulométrie assez étalée, ce qui favorise le remplissage des vides et améliore la compacité du mélange.
- **Gravier 3/8** : La courbe est plus raide, traduisant une granulométrie relativement uniforme concentrée entre 3 mm et 8 mm. Ce matériau présente peu de particules fines et joue principalement le rôle de squelette granulaire intermédiaire.
- **Gravier 8/15** : La courbe est également très verticale, caractéristique d'un matériau à granulométrie serrée comprise entre 8 mm et 15 mm. Cette fraction constitue l'ossature grossière du mélange.

Observations générales :

Les trois fractions sont bien séparées et présentent chacune une plage granulométrique relativement homogène. Cependant, on observe un **léger vide granulométrique entre le sable 0/3 et le gravier 3/8**, particulièrement dans la zone comprise entre environ 3 mm et 5 mm, où la proportion de grains intermédiaires reste limitée. Ce déficit peut réduire légèrement l'emboîtement des grains et augmenter le volume des vides si les matériaux sont utilisés sans correction granulométrique.

Malgré cela, l'association des fractions 0/3, 3/8 et 8/15 permet d'obtenir une granulométrie globale relativement étalée, favorable à la réalisation de couches granulaires ou de bétons présentant une bonne compacité après optimisation des dosages.

Conclusion :

Les matériaux analysés présentent une granulométrie conforme aux classes annoncées et une bonne homogénéité au sein de chaque fraction. Un ajustement des proportions de mélange ou l'ajout d'une fraction intermédiaire pourrait toutefois être envisagé afin de réduire le léger vide granulométrique observé entre le sable et le gravier 3/8 et ainsi améliorer la compacité globale du matériau.

Tableau II-9 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 8/15 de la carrière de SARL EL HILLAL (ain zergga)

- Passer M =4000g
- Laver M sur tamis de 0.08 mm
- secher le refus jusqu'à masse constant
- Passer le refus Ms = 3941.50g
- procéder au tamisage et remplir et tableau ci-après :

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus cumulés Ri en (g)	Refus cumulé en (%) Ri /M*100	Tamisats cumulé en 100-(Ri /M*100) (%)
40	-	-	-
31.5	-	-	-
25	-	-	-
20	-	-	100
16	672.73	16.82	83.18
12.5	3164.03	79.10	20.90
10	3805.13	95.13	04.87
8	3912.85	97.82	02.17
6.3	-	-	-
5	-	-	-
2.5	-	-	-
1.25	-	-	-
0.63	-	-	-
0.315	-	-	-
0.16	-	-	-
0.08	-	-	-
	Rn=27.37		
Passant au dernier tamis Tn =3912.85			
Rn + Tn =3940.22			
$(Ms-(Rn+Tn)/Ms)*100 = 0.032 < 2\%$			

**Tableau II-10 : représentant les valeurs des dimensions d'un gravier 3/8 de la carrière de
SARL EL HILLAL (ain zergga)**

- Passer M =3000g
- Laver M sur tamis de 0.08 mm
- secher le refus jusqu'à masse constant
- Passer le refus Ms = 2817.90g
- procéder au tamisage et remplir et tableau ci-après :

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus cumulés Ri en (g)	Refus cumulé en (%) Ri /M*100	Tamisats cumulé en 100-(Ri /M*100) (%)
40	-	-	-
31.5	-	-	-
25	-	-	-
20	-	-	-
16	-	-	-
12.5	-	-	-
10	-	-	100
8	112.64	3.75	96.24
6.3	1317.30	43.91	56.09
5	2143.19	71.41	28.56
2.5	2798.09	93.2	6.8
1.25	-	-	-
0.63	-	-	-
0.315	-	-	-
0.16	-	-	-
0.08	-	-	-
	Rn=15.12		
Passant au dernier tamis Tn =2798.09			
Rn + Tn =2813.21			
$(Ms-(Rn+Tn)/Ms)*100 =0.17 < 2\%$			

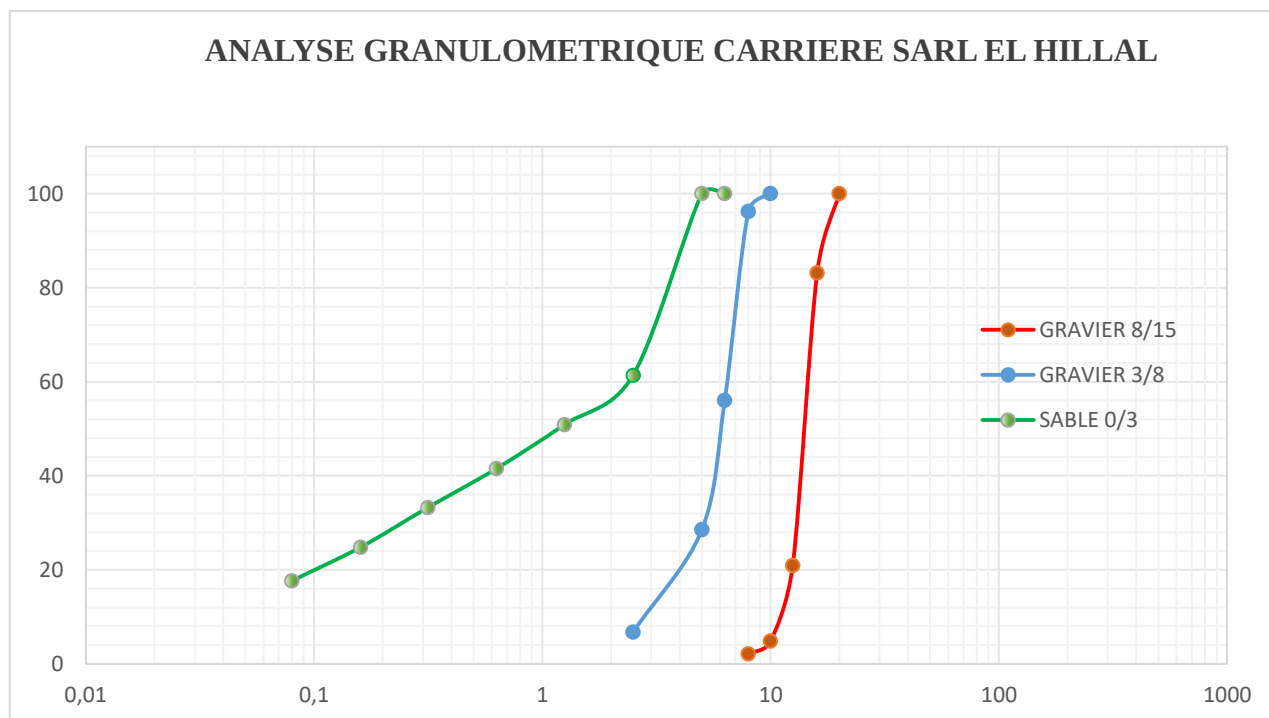
**Tableau II-11 : représentant les valeurs des dimensions d'un sable 0/3 de la carrière de SARL
EL HILLAL (ain zergga) :**

- Passer M =1000g
- Laver M sur tamis de 0.08 mm
- secher le refus jusqu'à masse constant
- Passer le refus Ms = 829.53g
- procéder au tamisage et remplir et tableau ci-après :

Ouverture des tamis en (mm)	Masse des refus cumulés Ri en (g)	Refus cumulé en (%) Ri /M*100	Tamisats cumulé en 100-(Ri /M*100) (%)
40	-	-	-
31.5	-	-	-
25	-	-	-
20	-	-	-
16	-	-	-
12.5	-	-	-
10	-	-	-
8	-	-	-
6.3	-	-	100
5	-	-	100
2.5	385.69	38.57	61.43
1.25	491.10	49.11	50.89
0.63	584.47	58.45	41.55
0.315	667.46	66.75	33.25
0.16	751.69	75.17	24.83
0.08	823.19	82.32	17.68
	Rn=3.61		
Passant au dernier tamis Tn =823.19			
Rn + Tn =826.80			
(Ms-(Rn+Tn)/Ms)*100 =0.32 < 2%			

a) Présentation des résultats :

Les courbes granulométriques des différentes carrières visitées sont représentés ci-dessous :

**b) Interprétation des résultats :****Analyse des courbes granulométriques:**

L'analyse granulométrique des matériaux provenant de la carrière **SARL EL HILLAL** met en évidence trois classes granulaires distinctes : le sable 0/3, le gravier 3/8 et le gravier 8/15.

- **Sable 0/3** : La courbe présente une répartition continue des particules fines et moyennes s'étalant d'environ 0,08 mm jusqu'à 5 mm (avec 100 % de passants atteint à 5 mm). La pente est régulière sur la majeure partie de son tracé avant de se redresser légèrement vers la fin, indiquant une granulométrie étalée qui favorise le comblement progressif des vides et améliore la compacité initiale du mélange.
- **Gravier 3/8** : La courbe est nettement plus raide, traduisant une granulométrie relativement uniforme et serrée concentrée entre 2,5 mm et 10 mm. Ce matériau présente une absence totale de particules très fines (le tamisage commence à 2,5 mm avec moins de 10 % de passants) et joue principalement le rôle de squelette granulaire intermédiaire.
- **Gravier 8/15** : La courbe affiche une allure presque verticale, caractéristique typique d'un matériau à granulométrie très étroite et serrée comprise entre 8 mm et 20 mm (avec 100 % de passants à 20 mm). Cette fraction grossière constitue l'ossature porteuse principale du mélange, garantissant la résistance mécanique.

Observations générales :

Les trois fractions granulométriques issues de la carrière SARL EL HILLAL apparaissent bien différenciées sur le graphique. Contrairement au cas précédent, on remarque ici que les courbes du gravier 3/8 et du gravier 8/15 sont extrêmement redressées et resserrées.

De plus, un phénomène marquant est à signaler : la courbe du sable 0/3 s'étend au-delà de sa classe théorique pour atteindre 100 % de passants à 5 mm. Il en résulte un **chevauchement (recouvrement)** notable avec le début de la courbe du gravier 3/8 dans la zone comprise entre 2,5 mm et 5 mm. Ce chevauchement garantit une excellente continuité granulaire et élimine tout risque de "trou" ou de vide granulométrique entre le sable et le premier gravillon. Il faudra néanmoins veiller à ce que l'accumulation d'éléments de taille comprise entre 2,5 et 5 mm (présents à la fois dans le sable et le gravier 3/8) ne vienne pas perturber l'optimum granulaire lors du mélange.

Conclusion :

Les matériaux analysés présentent des caractéristiques géométriques conformes aux exigences des classes annoncées, avec des graviers particulièrement propres et homogènes (courbes très raides). Le léger chevauchement observé entre la fraction grossière du sable et la fraction fine du gravier 3/8 devra simplement être pris en compte lors de l'étude de formulation (par la méthode de Dreux-Gorisse ou Faury) afin d'ajuster judicieusement le pourcentage de chaque matériau pour obtenir la compacité globale maximale.

Conclusion et Recommendations:

Le choix optimal – Carrière EURL S.L.I.G.O.S: D'un point de vue strictement granulométrique, cette carrière offre le meilleur équilibre. La régularité de son sable et l'espacement de ses graviers minimisent les risques de vides ou de surdosages localisés. C'est la combinaison théorique la plus simple à optimiser (courbe de Dreux-Gorisse facilitée).

Le point de vigilance – Carrière SARL OULD OUALI : Si vous utilisez ces matériaux, il faudra surveiller de près l'excès de fines dans le sable qui pourrait nuire à la maniabilité du béton frais et exiger un adjuvant plastifiant ou un apport d'eau supplémentaire.

Le point d'ajustement – Carrière SARL EL HILLAL : Cette carrière est très satisfaisante, mais lors du calcul de vos proportions de mélange, il faudra réduire légèrement le pourcentage théorique de gravier 3/8 pour compenser le fait que le sable contient déjà beaucoup de grains de cette taille.

II.5.2. Module de finesse :

Les sables doivent présenter une granulométrie équilibrée, garantissant une proportion adéquate d'éléments fins, sans excès ni insuffisance. En effet, une teneur élevée en fines entraîne une augmentation de la demande en eau du béton, tandis qu'un sable trop grossier réduit la plasticité du mélange, ce qui complique sa mise en œuvre. Le caractère plus ou moins fin d'un sable est quantifié par le module de finesse (MF). Ce paramètre correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, divisée par 100, obtenus sur les tamis normalisés de modules 23, 26, 29, 32, 35 et 38. Il constitue un indicateur couramment utilisé pour caractériser la finesse des sables destinés aux bétons. Les dimensions nominales des tamis normalisés, utilisés dans cette détermination, sont présentées dans le tableau ci-dessus. La classification des sables en fonction de leur finesse peut être établie à partir de travaux relatifs à l'influence de la granulométrie sur les propriétés du béton [2], selon les intervalles suivants : $1,8 < MF < 2,2$: sable recommandé pour une meilleure ouvrabilité et une facilité de mise en œuvre. $2,2 < MF < 2,8$: plage optimale assurant un bon compromis entre ouvrabilité, résistance mécanique et limitation des risques de ségrégation. $2,8 < MF < 3,2$: sable adapté à la recherche de résistances élevées, mais pouvant entraîner une diminution de l'ouvrabilité et un risque accru de ségrégation. Les valeurs du module de finesse des sables provenant des différentes carrières étudiées sont récapitulées dans le tableau suivant.

1. Préparation de l'échantillon :

- **Prélèvement** : Prélever une quantité de sable représentative (souvent après quartage).
- **Séchage** : Sécher l'échantillon à l'étuve à 110°C jusqu'à masse constante.
- **Pesée** : Peser une masse exacte M (généralement autour de 500g ou 1kg selon la taille maximale des grains).

2. Opération de tamisage :

L'analyse s'effectue en utilisant une colonne de tamis normalisés emboîtés par ordre d'ouverture décroissante. Pour le calcul du module de finesse, on se concentre sur la série de tamis suivants (en mm) : **0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5,0**.

- Verser l'échantillon au sommet de la colonne.
- Agiter la colonne (manuellement ou via une tamiseuse vibrante) pendant environ 10 minutes.
- S'assurer que le tamisage est complet (le refus ne doit plus varier de plus de 1% en une minute de vibration).

3. Pesage des refus :

- Peser le contenu restant sur chaque tamis (le **refus partiel**).
- Noter les résultats pour chaque diamètre d_i .

4. Calculs des résultats :

Le module de finesse est égal au **1/100ème de la somme des refus cumulés**, exprimés en pourcentage de la masse totale, sur la série de tamis spécifiée.

$$\text{Formule : } MF = \frac{\sum \text{Refus cumulés en \%}}{100}$$

Note importante : On additionne les pourcentages de refus cumulés sur les tamis de la série : 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5,0 mm.

Tableau II.12 : Modules de finesse des échantillons prélevés.

Echantillons	Modules de finesse
1. SARL O.OUALI	2.45
2. EURL S.L.I.G.O.S	2.57
5. SARL EL HILLAL	2.88

5. Interprétation du Module de Finesse (MF) :

A/ Carrière SARL O. OUALI : Module de Finesse = 2,45

Le module de finesse obtenu pour cette carrière se situe dans la zone préférentielle ($2,2 < 2,45 < 2,8$), ce qui indique que le sable présente une granulométrie équilibrée et adaptée aux usages courants en construction. Cette valeur traduit un bon compromis entre finesse et grossièreté des grains, conférant au matériau une maniabilité satisfaisante ainsi que des performances mécaniques adéquates. Ainsi, ce sable peut être considéré comme favorable pour la formulation des mortiers et bétons nécessitant à la fois une bonne ouvrabilité et une résistance convenable.

B/ Carrière EURL S.L.I.G.O.S: Module de Finesse = 2,57

Le module de finesse obtenu pour la carrière **EURL S.L.I.G.O.S** est de 2,57, une valeur très proche de celle de la première carrière et située également dans la zone préférentielle. Ce résultat indique une granulométrie équilibrée du sable, assurant une bonne maniabilité ainsi qu'une résistance mécanique satisfaisante des mortiers et bétons. Par ailleurs, la similitude des valeurs obtenues peut s'expliquer par la nature géologique commune des deux carrières, issues d'une roche sédimentaire calcaire destinée à la production d'agréats. Cette origine lithologique comparable confère aux matériaux des caractéristiques granulaires et physiques relativement homogènes, favorables aux applications dans le domaine de la construction.

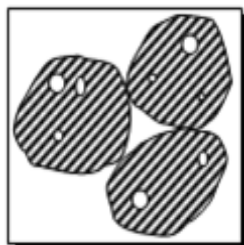
C/ Carrière SARL EL HILLAL : Module de Finesse = 2,88

Le module de finesse obtenu pour la carrière **SARL EL HILLAL** est de 2,88, une valeur située dans l'intervalle $2,8 < 2,88 < 3,2$, caractérisant un sable légèrement grossier. Cette granulométrie traduit une proportion plus importante de grains de grande taille, ce qui favorise l'obtention de bétons présentant de bonnes performances mécaniques et une résistance élevée. Toutefois, ce type de sable peut réduire la maniabilité du mélange et accroître le risque de ségrégation lors de la mise en œuvre. Par conséquent, son utilisation nécessite un contrôle adéquat de la formulation afin de garantir une bonne homogénéité et une ouvrabilité satisfaisante du béton.

II.5.3. Propriétés physico-chimiques :

II.5.3.1. Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue d'un matériau correspond à la masse d'un mètre cube de matière, en excluant l'ensemble des vides, qu'il s'agisse des vides inters granulaires ou des pores internes des grains.



Volume hachuré = Volume absolu (sans pores)

Le volume pris en compte est donc le **volume absolu**, ne comprenant pas les pores ni les espaces vides, comme illustré sur le schéma correspondant. La masse volumique absolue est définie comme le rapport entre la masse de l'unité de volume absolu du matériau, mesurée à une température donnée, et la masse du même volume d'eau distillée à la même température. Elle s'exprime donc comme une grandeur relative permettant de caractériser la densité intrinsèque du matériau.

1. Préparation du matériel et de l'échantillon :

- **Séchage** : Sécher l'échantillon de granulat (sable ou gravier) à l'étuve à 110°C jusqu'à ce que sa masse ne varie plus.
- **Refroidissement** : Laisser refroidir dans un dessiccateur pour éviter la reprise d'humidité.
- **Pesée initiale** : Peser une masse précise de granulat sec, notée M_{sec} (par exemple 50g ou 100g selon la taille du pycnomètre).

2. Procédure au pycnomètre :

- **Remplissage partiel** : Introduire l'échantillon sec dans le pycnomètre propre et sec.
- **Immersion** : Ajouter un liquide dont on connaît la masse volumique (généralement de l'eau distillée) jusqu'à ce que l'échantillon soit recouvert aux deux tiers environ.
- **Élimination de l'air** : C'est l'étape cruciale. Il faut extraire les bulles d'air emprisonnées entre les grains. On utilise pour cela :
 - Une pompe à vide (pression réduite pendant environ 15 min).
 - Ou une ébullition douce (pendant 30 min) suivie d'un refroidissement.
- **Complément** : Finir de remplir le pycnomètre avec le liquide jusqu'au trait de jauge.
- **Pesée finale** : Peser le pycnomètre contenant l'échantillon et le liquide. Noter cette masse M_1 .

3. Tarage du pycnomètre :

- Vider et nettoyer le pycnomètre.
- Le remplir uniquement avec le liquide (eau distillée) jusqu'au trait de jauge, à la même température que lors de l'étape précédente.
- Peser l'ensemble. Noter cette masse M_2 .

4. Calcul de la masse volumique absolue :

La formule repose sur le principe de la substitution de volume (poussée d'Archimède) :

$$\rho_s = \frac{M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}} - (M_1 - M_2)} \times \rho_{\text{liquide}}$$

- M_{sec} : Masse de l'échantillon sec.
- M_1 : Masse du pycnomètre + échantillon + liquide.
- M_2 : Masse du pycnomètre rempli de liquide seul.
- ρ_{liquide} : Masse volumique du liquide utilisé (pour l'eau, on prend généralement 1g/cm^3 ou 1000 kg/m^3).

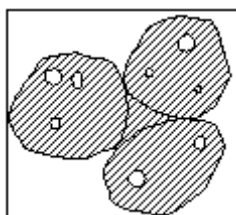
5. Valeurs usuelles :

Pour les granulats courants utilisés dans le bâtiment (calcaire, silice, granite), la masse volumique absolue se situe généralement entre **2500 et 2800 kg/m³** (soit 2,5 à 2,8 g/cm³).

Important : Ne pas confondre cette valeur avec la **masse volumique apparente**, qui inclut les vides entre les grains lors du stockage.

II.5.3.2. Masse volumique réelle :

La masse volumique réelle d'un matériau correspond à la masse d'un mètre cube de matériau en tenant compte de la porosité interne des grains, mais en excluant uniquement les vides intergranulaires situés entre les particules.



Volume hachuré = Volume réelle (apparent)

Ainsi, le volume considéré est le volume des solides incluant les pores internes, comme représenté sur le schéma associé. La densité réelle est définie comme le rapport entre la masse réelle d'un volume unitaire de matériau sec, mesuré à une température donnée, et la masse du même volume d'eau distillée à la même température. Elle permet ainsi de caractériser la compacité intrinsèque du matériau en tenant compte de sa structure interne.

1. Préparation et saturation :

- **Immersion** : Plonger l'échantillon de granulats dans l'eau à température ambiante pendant 24 heures. Cela permet de remplir tous les pores accessibles à l'eau.
- **Séchage superficiel** : C'est l'étape la plus délicate. Il faut sortir les granulats de l'eau et les sécher (avec un chiffon ou un courant d'air) jusqu'à ce que la pellicule d'eau brillante à la surface disparaisse, mais que le grain reste humide à l'intérieur. On dit que le granulat est Saturé à Surface Sèche (SSS).

2. Procédure (Méthode du panier hydrophile) :

1. **Pesée SSS** : Peser la masse de l'échantillon saturé à surface sèche dans l'air. Noter M_{SSS} .
2. **Pesée hydrostatique** : Placer l'échantillon dans un panier métallique immergé dans l'eau et peser l'ensemble. Noter M_w (masse apparente dans l'eau).
3. **Séchage final** : Placer l'échantillon à l'étuve (110°C), puis peser la masse sèche finale. Noter M_{sec} .

3. Calcul de la masse volumique réelle :

On distingue généralement la masse volumique réelle sur échantillon sec

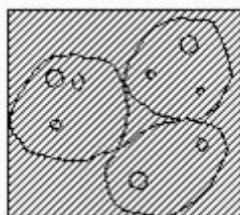
$$\rho_{rd} = \frac{M_{sec}}{M_{SSS} - M_w} \times \rho_{eau}$$

Pourquoi faire ces trois essais ?

- **L'apparente** : Pour savoir combien de camions commander ou la taille de votre cuve de stockage.
- **La réelle** : Pour la formulation du béton (calcul du volume occupé par les granulats dans le mélange).
- **L'absolue** : Pour des calculs de porosité très précis ou des matériaux spéciaux (bétons haute performance).

II.5.3.3. Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau correspond à la masse d'un mètre cube de matériau pris en tas, incluant à la fois les vides internes (perméables et imperméables) des grains ainsi que les vides inters granulaires. Elle représente donc le volume global occupé par le matériau dans son état naturel ou remanié. Cette grandeur varie selon l'état de conditionnement du matériau, notamment selon qu'il soit compacté ou non compacté.



Volume hachuré = Volume du récipient

Il est ainsi nécessaire de préciser systématiquement l'état considéré : masse volumique apparente à l'état compacté ou masse volumique apparente à l'état non compacté. La densité apparente, en état compacté ou non compacté, est définie comme le rapport entre la masse apparente d'un volume unitaire de matériau, à une température donnée, et la masse du même volume d'eau distillée à la même température. La masse volumique apparente d'un granulat dépend de plusieurs paramètres, notamment la forme des grains, leur granulométrie, ainsi que le degré de compactage et le taux d'humidité. Cette propriété est principalement utilisée dans le cas des dosages volumétriques des constituants du béton. Toutefois, cette méthode présente certaines limites liées au phénomène de foisonnement, pouvant affecter la précision des dosages.

1. Préparation du matériel :

- **Récipient étalon** : Un cylindre métallique de volume connu (V), rigide et étanche.
- **Balance** : Sensible au gramme près.
- **Entonnoir ou pelle** : Pour verser le matériau.

2. Procédure de l'essai (Méthode sans compactage) :

1. **Pesée du contenant vide** : Peser le récipient propre et sec. Noter sa masse M_0 .
2. **Remplissage** : Verser les granulats (sable ou gravier) à l'aide d'un entonnoir ou d'une pelle, en se tenant à environ 5 cm au-dessus du bord du récipient. Le but est de laisser le matériau se mettre en place naturellement.
3. **Arasement** : À l'aide d'une règle métallique, égaliser la surface en éliminant l'excédent de matériau, sans exercer de pression (pour ne pas tasser).
4. **Pesée finale** : Peser le récipient rempli de granulats. Noter la masse M_1 .

3. Calcul de la masse volumique apparente :

Le calcul est direct : c'est le rapport entre la masse du matériau et le volume qu'il occupe.

$$\rho_a = \frac{M_1 - M_0}{V}$$

- $M_1 - M_0$: Masse nette du granulat (g ou kg).
- V : Volume du récipient (cm³ ou m³)

Il est utile de rappeler les informations souscrites dans le tableau ci-dessous afin d'interpréter les résultats obtenus

Tableau II-13 : résultats de laboratoire

Caractéristique	Masse Volumique Absolue	Masse Volumique Apparente
Volume considéré	Uniquement la matière solide.	Matière solide + Vides entre grains.
Vides inclus	Aucun (on élimine l'air au pycnomètre).	Tous les vides d'air entre les grains.
Valeur typique	2500 à 2800 kg/m ³ (lourd)	1400 à 1600 kg/m ³ (plus léger)
Utilité	Formulations de béton précises.	Calcul des stockages et camions.

II.5.3.4. Absorption :

La plupart des granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant une certaine période sont susceptibles d'absorber de l'eau lors de leur mise en contact avec un milieu humide. Ce phénomène, correspondant à la pénétration du liquide dans la structure poreuse du matériau, s'accompagne d'une augmentation de sa masse, appelée ****absorption****. L'absorption varie considérablement en fonction de la nature du granulat. Elle peut être négligeable pour les granulats denses, tandis qu'elle peut dépasser 30 % de la masse sèche dans le cas des granulats légers. De manière générale, les granulats naturels utilisés dans la fabrication du béton présentent une faible porosité et absorbent très peu d'eau lors du malaxage. En revanche, certains granulats artificiels, tels que le ****LECA (Light Expanded Clay Aggregate) ****, présentent une forte porosité, ce qui rend nécessaire la prise en compte de l'absorption dans le calcul de la quantité d'eau de gâchage du béton. Dans le cas de granulats partiellement poreux, il est recommandé de travailler en condition de ****saturation à surface sèche (SSS)**** lors de l'étude de la composition du béton. Cet état est obtenu en immergeant les granulats dans l'eau pendant plusieurs heures, puis en les laissant s'égoutter jusqu'à ce que leur surface devienne sèche au toucher sans perte d'eau interne.

1. Préparation de l'échantillon :

- **Lavage** : Laver l'échantillon sur le tamis de 0,063 mm pour éliminer les fines.
- **Séchage** : Sécher l'échantillon à l'étuve à 110°C jusqu'à masse constante.
- **Immersion** : Plonger les granulats dans l'eau à température ambiante ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) pendant **24 heures**. L'eau doit recouvrir largement l'échantillon.

2. Passage à l'état Saturé à Surface Sèche (SSS) :

C'est l'étape la plus technique de l'essai. Après les 24h, il faut retirer l'eau de surface sans vider les pores internes.

- **Pour les Gravillons** : Étaler les granulats sur une nappe absorbante et les essuyer avec un chiffon jusqu'à ce que le film brillant d'eau disparaisse.
- **Pour le Sable (Test du cône) :**
 1. Remplir un moule tronconique avec le sable humide.
 2. Araser et soulever le moule verticalement.
 3. Si le cône s'affaisse légèrement (début d'éboulement), le sable est SSS. S'il garde sa forme, il est trop humide. S'il s'effondre totalement, il est trop sec.

3. Les pesées successives :

1. **Masse SSS (M_{ss})** : Peser immédiatement l'échantillon une fois l'état saturé à surface sèche atteint.
2. **Séchage** : Placer cet échantillon à l'étuve à 110°C jusqu'à séchage complet.
3. **Masse Sèche (M_{sec})** : Peser la masse après séchage.

4. Calcul du coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption (W_a ou A_b) est exprimé en pourcentage de la masse sèche :

$$Ab(\%) = \frac{M_{ss} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

5. Interprétation et utilité :

Le coefficient d'absorption varie selon la porosité du matériau :

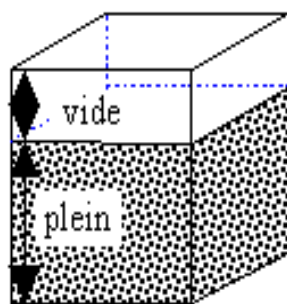
Tableau II-14 : Le coefficient d'absorption

Type de granulat	Absorption typique (A_b)
Granulats denses (Quartz, Granite)	< 1
Granulats courants (Calcaire)	1% à 3%
Granulats poreux (Laitier, Recyclés)	> 5%

II.5.3.5. Porosité et compacité :**A). Porosité :**

En général la porosité est le rapport du volume des vides au volume total.

Volume quelconque



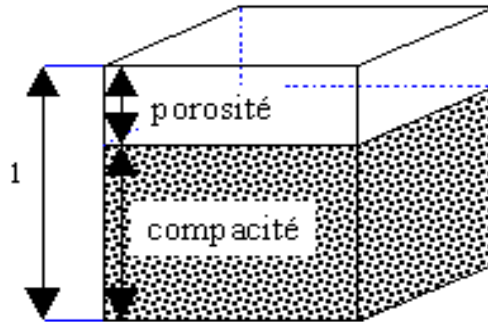
$$p = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}}$$

On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

B). Compacité :

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total. Ou volume des pleins par unité de volume apparent

Volume unitaire



$$C = \frac{\text{Plein}}{\text{Vide} + \text{Plein}}$$

$$p = \frac{\text{Vide}}{\text{Vide} + \text{Plein}}$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation : $p + c = 1$

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%. En effet :

$$p + c = \frac{\text{volume des pleins}}{\text{volume total}} + \frac{\text{volume des pleins}}{\text{volume total}} = \frac{\text{volume total}}{\text{volume total}} = 1$$

Si l'on connaît la masse volumique D et la masse spécifique g d'un matériau, il est aisé de calculer sa compacité et porosité.

II.5.3.6. Teneur en eau :

$$c = \frac{\text{volume des pleins}}{\text{volume total}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} * \frac{M}{M} = \frac{M/V_{\text{apparent}}}{M/V_{\text{absolu}}}$$

La teneur en eau d'un matériau correspond au rapport entre la masse d'eau qu'il contient et la masse du même matériau à l'état sec. Elle peut également être définie comme la masse d'eau W contenue par unité de masse de solide sec. Autrement dit, elle exprime la quantité d'eau présente dans le matériau rapporté à sa masse sèche de référence.

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

E = Poids d'eau dans le matériau.

P_s = Poids du matériau sec.

P_h = Poids matériau humide

Si W est exprimé en % :

$$W\% = 100 \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

A partir des définitions données plus haut, on peut écrire les relations

$$E = \frac{W \%}{100} P_s \quad P_h = P_s + E = \left(1 + \frac{W \%}{100}\right) P_s \quad P_s = \frac{P_h}{1 + \frac{W \%}{100}}$$

$$E = \frac{W \%}{100 + W \%} P_h$$

Les granulats employés dans la fabrication du béton contiennent généralement une quantité d'eau variable, dépendant principalement des conditions climatiques et environnementales. Par conséquent, la quantité réelle d'eau de gâchage à introduire dans le mélange correspond à la quantité d'eau théorique requise, diminuée de la quantité d'eau déjà présente dans les granulats. Il est donc indispensable de disposer de méthodes appropriées permettant de déterminer avec précision la teneur en eau des granulats.

Remarque : Actions de l'eau sur les matériaux

Lorsque l'ensemble des vides d'un matériau poreux est entièrement occupé par l'eau, celui-ci est considéré comme **saturé**. Le **degré de saturation** correspond au rapport entre le volume d'eau contenu dans les pores et le volume total des vides. Ce paramètre joue un rôle déterminant dans les mécanismes de dégradation des matériaux poreux soumis aux cycles de gel-dégel. En effet, lors de la transformation de l'eau en glace, on observe une **augmentation volumique d'environ 9 %**, générant des pressions internes importantes au sein de la structure poreuse. Ces contraintes peuvent provoquer l'initiation et la propagation de fissures, conduisant à la détérioration progressive, voire à la rupture du matériau. Par ailleurs, de nombreux matériaux de construction tels que le bois, certaines roches sédimentaires et le béton présentent un comportement hygroscopique : ils **subissent un gonflement en présence d'humidité** et une **rétraction lors de la dessiccation**. Ces variations dimensionnelles influencent directement leur durabilité et leurs performances mécaniques

Présentation des résultats :

Les résultats obtenus de ces caractéristiques physico-chimiques concernant les différents échantillons utilisés sont rassemblés dans le tableau suivant :

Tableau II-15 : Les résultats obtenus de ces caractéristiques physico-chimiques

Caractéristiques physico-chimiques Matériaux Utilisé		Masse volumique apparente $\gamma_d(t/m^3)$	Masse volumique absolue $\gamma_d(t/m^3)$	Compacité C	Porosité P	Teneur en eau ω (%)
SARL O.OUALI	8/15	1.46	2.90	0.48	0.52	0.022
	3/8	1.48	2.74	0.48	0.52	0.071
	0/3	1.57	2.76	0.52	0.48	-
EURL S.L.I.G.O.S	8/15	1.49	2.78	0.54	0.46	0.012
	3/8	1.38	2.80	0.48	0.52	0.066
	0/3	1.49	2.76	0.54	0.46	-
SARL EL HILLAL	8/15	1.36	2.67	0.46	0.54	0.009
	3/8	1.27	2.70	0.48	0.52	0.042
	0/3	1.68	2.77	0.49	0.51	-

II.5.3.7. Propreté et forme des granulats**A). Propreté des granulats :**

Les granulats utilisés dans la fabrication du béton doivent présenter un haut degré de propreté, car la présence d'impuretés peut perturber le processus d'hydratation du ciment et altérer l'adhérence entre les granulats et la pâte cimentaire.

A.1). Essai d'équivalent de sable :

L'essai d'équivalent de sable permet d'évaluer de manière qualitative et quantitative la teneur en fines argileuses et poussiéreuses présentes dans le sable, sans toutefois en déterminer la nature.

Le principe de l'essai consiste à agiter une quantité de sable dans une solution lavante normalisée, composée de chlorure de calcium anhydre, de glycérine et de formaldéhyde dissous dans de l'eau. L'échantillon est ensuite laissé au repos afin de permettre la sédimentation des particules. On distingue alors :

- une hauteur h_1 correspondant au dépôt sableux,
- une hauteur h_2 correspondant à la hauteur totale incluant le floculat en suspension.

La mesure de h_1 est effectuée à l'aide d'un piston normalisé, après lecture de h_2 .

L'équivalent de sable est alors donné par la relation :
$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

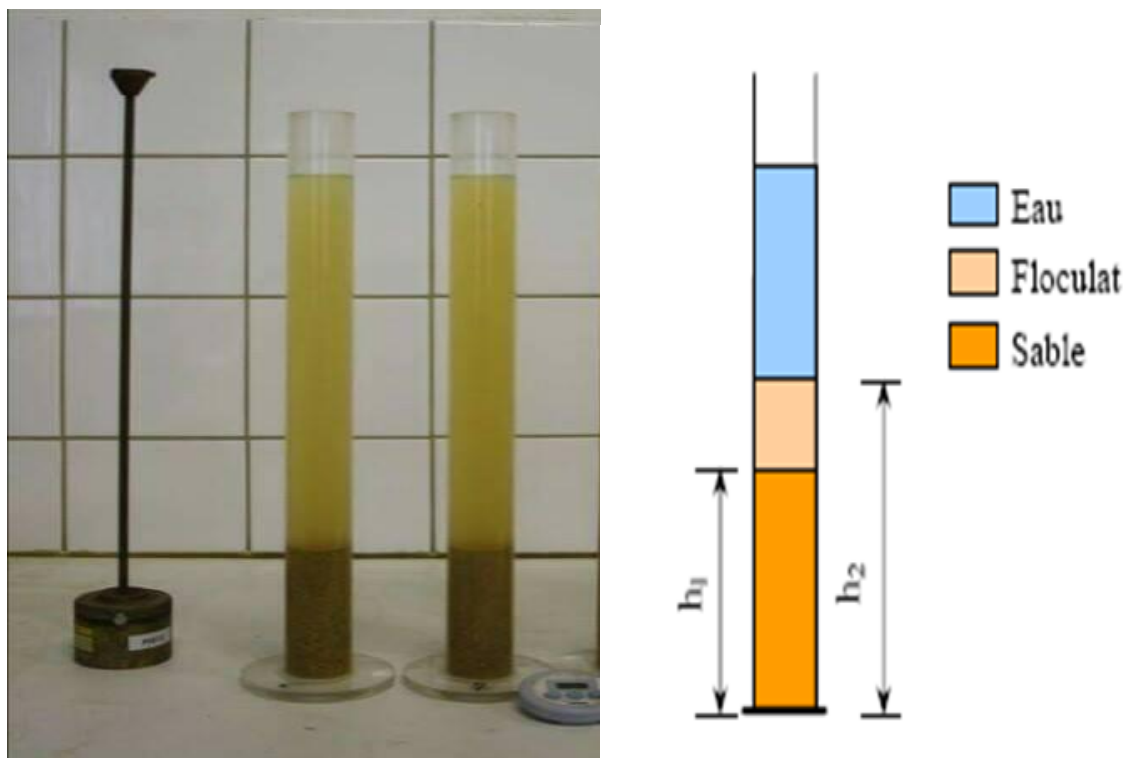


Figure II-6 : Essai d'équivalent de sable

1. Préparation de l'échantillon :

- **Tamissage** : On travaille sur la fraction **0.08 mm** du sable. Si le sable contient des grains plus gros, on les élimine au tamis.
- **Prélèvement** : On prépare deux éprouvettes de test. Pour chaque essai, on pèse environ **120 g** de sable sec.
- **Humidification** : Si le sable est très sec, on l'humidifie légèrement pour éviter que les fines ne s'envolent.

2. Procédure de manipulation :

- **Remplissage initial** : Verser la solution lavante (généralement à base de chlorure de calcium, glycérine et formaldéhyde) dans l'éprouvette graduée jusqu'au premier trait.
- **Introduction du sable** : Verser l'échantillon à l'aide d'un entonnoir. Frapper énergiquement le bas de l'éprouvette avec la paume de la main pour chasser les bulles d'air.
- **Repos (Imbibition)** : Laisser reposer pendant **10 minutes** pour que la solution sature bien les amas d'argile.
- **Agitation** : Boucher l'éprouvette et l'agiter horizontalement de façon vigoureuse (souvent à l'aide d'une machine) pendant **30 secondes**.
- **Lavage et Remplissage** : Introduire le tube laveur jusqu'au fond. Faire remonter le tube en effectuant des mouvements de rotation pour bien laver les grains de sable. Arrêter le remplissage lorsque le liquide atteint le trait supérieur.
- **Décantation** : Laisser l'éprouvette strictement immobile pendant **20 minutes**.

3. Mesures (Les lectures) :

Après les 20 minutes, on effectue deux mesures :

- **H₁ (Hauteur totale)** : Niveau supérieur du floculat (la partie trouble en suspension).
- **H₂ (Hauteur du sable)** : Niveau du sable déposé au fond. On utilise généralement un **piston taré** que l'on descend doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sable. On lit alors la hauteur au niveau du manchon du piston.

4. Calcul de l'Équivalent de Sable (ES) :

Le résultat est le rapport des deux hauteurs exprimées en pourcentage :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Note : On calcule la moyenne des deux éprouvettes. Si l'écart entre les deux est trop grand, l'essai doit être refait.

Valeurs usuelles de l'Équivalent de Sable (ES) : Le score obtenu définit l'usage possible du sable

- **ES < 60%** : Sable argileux. Risque de retrait important ou de mauvaise tenue du béton. Généralement refusé.
- **60% ≤ ES < 70%** : Sable légèrement argileux. Admis pour des bétons de qualité secondaire.
- **70% ≤ ES < 80%** : **Sable propre**. C'est la zone idéale pour les bétons de structure courants.
- **80% ≤ ES < 90%** : Sable très propre. Absence quasi-totale d'argile.
- **ES ≥ 90%** : Sable extrêmement propre. Attention, un manque total de fines peut rendre le béton difficile à mettre en œuvre (manque de plasticité).

A.2). Essai au bleu de méthylène :

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer la capacité d'adsorption des particules fines présentes dans un sol ou un sable. Cette adsorption concerne principalement les minéraux argileux, les matières organiques ainsi que certains hydroxydes de fer. Le principe de l'essai repose sur l'affinité de ces fines pour le bleu de méthylène, dont la quantité fixée par le matériau est exprimée par la valeur de bleu (VBS). Cette valeur correspond à la masse de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines, et constitue un indicateur global de l'activité de surface des particules fines. À partir de cette valeur, il est possible de déterminer un paramètre fondamental en mécanique des sols : la surface spécifique des fines contenues dans le sable étudié. Cette surface spécifique reflète la nature et l'activité des particules fines. Elle est généralement estimée à l'aide d'une relation empirique reliant la surface spécifique à la valeur de bleu, ce qui permet d'apprécier le comportement physico-chimique du matériau.



Figure II-7 : Essai au bleu de méthylène

$$VBS = \frac{V \times C_m}{m_s}$$

Où :

- **VBS** : Valeur de bleu de méthylène exprimée en g de bleu pour 100g de sol sec.
- **V** : Volume total de solution de bleu de méthylène versée pour atteindre la saturation, en cm³
- **C_m** : Concentration de la solution de bleu de méthylène généralement 10 g
- **m_s** : Masse de la prise d'essai de sol sec, en g

1. Principe de l'essai :

On injecte successivement des doses de colorant (bleu de méthylène) dans un mélange d'eau et de sable. Les argiles absorbent le bleu. Dès que les argiles sont "saturées" (elles ne peuvent plus absorber de colorant), le bleu reste libre dans l'eau.

2. Équipement nécessaire :

- Une burette graduée pour doser le bleu.
- Un agitateur à ailettes (vitesse constante de 600 tr/min).
- Du papier filtre de laboratoire.
- Une solution de bleu de méthylène à 10 g/L.

3. Procédure étape par étape :

- **Préparation** : Verser 200 g de sable (fraction 0/2 mm) dans 500 ml d'eau distillée dans un récipient.
- **Agitation** : Agiter le mélange à 600 tr/min pendant 5 minutes pour bien libérer les particules argileuses.
- **Dosage** : Ajouter 5 ml de solution de bleu de méthylène à l'aide de la burette.
- **Test de la tache (Spot test)** :
 - Après 1 minute d'agitation, prélever une goutte du mélange avec une baguette en verre et la déposer sur le papier filtre.
 - **Observation** : Si la tache est un cercle bleu foncé entouré d'une zone humide incolore, l'argile n'est pas encore saturée.

- **Répétition** : Ajouter à nouveau 5 ml de bleu et recommencer le test de la tache.
- **Point de saturation** : L'essai est terminé quand une **auréole bleu clair persistante** apparaît autour de la tache centrale sur le papier filtre. On confirme cette auréole en répétant le test de la tache toutes les minutes pendant 5 minutes sans ajouter de bleu.

4. Calcul de la valeur de bleu (VB) :

On note V le volume total de bleu introduit (en ml). La valeur de bleu du sable est calculée ainsi :

$$VB = \frac{V}{M} \times 10$$

(Où M est la masse de l'échantillon de sable sec). Le résultat s'exprime en grammes de bleu par kilogramme de sable (g/kg).

Valeurs usuelles du bleu de méthylène :

La valeur VB indique la dangerosité des fines :

Tableau II-16 : Les Valeurs usuelles du bleu de méthylène

Valeur VB (g/kg)	Interprétation
0 à 0,1	Sable très propre, absence totale d'argile.
0,2 à 1,0	Sable propre, convient pour des bétons de haute qualité.
1,0 à 1,5	Seuil limite : le sable commence à être sensible à l'eau.
1,5 à 2,5	Sable argileux, risque de fissuration et baisse de résistance.
> 2,5	Sable très argileux, impropre à la confection du béton.

Les valeurs de bleu et de l'équivalent de sable sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau II-17 : Les résultats obtenus de l'équivalent de sable et bleu de méthylène

Carrières	Valeur de bleu (V _B)	Equivalent de sable
1. SARL O. OUALI	1,21	80.58
2. EURL S.L.I.G.O. S	1,95	55.18
3. SARL EL HILLAL	0,5	79.23

b) forme des granulats :

La forme des granulats est caractérisée à partir de trois dimensions géométriques principales :

- **La longueur (L)** : elle correspond à la distance maximale séparant deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat.
- **L'épaisseur (E)** : elle représente la distance minimale entre deux plans parallèles tangents au granulat.
- **La grosseur (G)** : elle correspond à la dimension de la plus petite maille carrée du tamis permettant le passage du granulat.

À partir de ces paramètres géométriques, on définit le **coefficient d'aplatissement (A)** d'un ensemble de granulats. Ce coefficient correspond au pourcentage massique des éléments granulaires vérifiant une condition d'aplatissement, traduisant ainsi la proportion de grains de forme plate au sein du matériau. $G/E > 1.58$



Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$, on peut déterminer aussi :

B.1). Influence de la forme des granulats :

La forme des granulats a une influence directe sur leurs caractéristiques géométriques ainsi que sur le comportement des matériaux dans lesquels ils sont incorporés. Elle est notamment caractérisée par deux indices principaux :

- L'**indice d'allongement (β)**, défini par : $\beta = G/L \dots \leq 1$
- L'**indice d'aplatissement (α)**, défini par : $\alpha = E/G \dots \leq 1$

Ces paramètres permettent de quantifier respectivement le degré d'allongement et d'aplatissement des granulats. La forme des granulats influence directement :

- La **maniabilité du béton**, notamment sa facilité de mise en œuvre et de compactage ;
- La **compacité du mélange granulaire**, et par conséquent le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

Ainsi, des granulats trop allongés ou trop plats peuvent nuire à la qualité du béton en augmentant la porosité et en réduisant sa compacité.

État de surface des granulats :

L'état de surface des grains granulaires constitue un paramètre important influençant le comportement des matériaux cimentaires.

Il agit principalement sur :

- La **compacité du mélange granulaire**, en modifiant l'arrangement des grains et le volume des vides ;
- L'adhérence **entre les granulats et la pâte de ciment**, qui conditionne la qualité de la liaison interfaciale et, par conséquent, les performances mécaniques du béton.

De manière générale, la qualité de la forme des granulats est d'autant meilleure qu'elle se rapproche d'une géométrie idéale, c'est-à-dire **une forme sphérique ou cubique**, favorisant ainsi une meilleure compacité et une optimisation des propriétés mécaniques du béton.

Tableau II-18 : Forme des granulats à prendre en consideration

Cubes et sphères	Trois dimensions à peu près égales (Bonne compacité)
Plaquettes	Une dimension beaucoup plus petite que les deux autres (Mauvaise compacité)
Aiguilles	Une dimension beaucoup plus grande que les deux autres (Très mauvaise compacité)

II.5.4. Caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des granulats ne sont généralement pas déterminées à l'aide des essais classiques de traction ou de compression, comme c'est le cas pour les matériaux homogènes. En effet, leur comportement est plutôt évalué au moyen d'essais spécifiques, conçus pour reproduire les sollicitations auxquelles ils sont soumis en service. Ainsi, des essais adaptés sont mis en œuvre afin d'apprécier certaines propriétés mécaniques particulières, telles que la résistance à l'usure, notamment pour les granulats destinés aux bétons de chaussées. Ces essais permettent d'évaluer la durabilité des granulats vis-à-vis des actions mécaniques répétées et des conditions d'exploitation spécifiques.

Tableau II-19 : Les résultats obtenus des caractéristiques mécaniques des granulats

Carrières	Échantillon	Propreté P (%)	Aplatissement A (%)
SARL O. OUALI	8/15	0.46	6.49
	3/8	1.52	35.80
EURL S.L.I.G.O.S	8/15	0.64	15.75
	3/8	2.14	31.03
SARL EL HILLAL	8/15	0.75	5.83
	3/8	0.93	14.53

II-5-4-1. Résistance au choc (Essai Los Angeles) :

L'essai Los Angeles a pour objectif d'évaluer la résistance des granulats aux chocs et à la fragmentation mécanique, sous l'effet d'actions répétées similaires à celles rencontrées en service.

Cet essai consiste à déterminer la masse m des particules fines, de dimension inférieure à **1,6 mm**, générées par la fragmentation d'un échantillon granulaire dont les dimensions sont comprises entre **4 mm et 50 mm**. L'échantillon est introduit dans un cylindre métallique normalisé, en présence de boulets d'acier calibrés, puis soumis à une série de **500 rotations** dans la machine Los Angeles. Sous l'effet combiné des chocs et des frottements produits lors de la rotation du cylindre, les granulats subissent une dégradation progressive. À l'issue de l'essai, le matériau est tamisé afin de quantifier la masse des éléments fins produits, ce qui permet d'apprécier le degré de résistance du granulat à la fragmentation. La valeur obtenue constitue un indicateur essentiel pour l'évaluation de la qualité mécanique des granulats, notamment dans les domaines des travaux routiers et des matériaux pour chaussées, où une forte résistance aux chocs est requise.

1. Préparation de l'échantillon :

- **Classe granulaire** : L'essai se fait généralement sur la fraction **10/14 mm** (on utilise les tamis de 10 mm et 14 mm pour isoler cette classe).
- **Lavage et Séchage** : Laver les granulats pour éliminer les poussières, puis les sécher à l'étuve à 110°C jusqu'à masse constante.
- **Pesée** : Peser exactement **5000 g** (soit 5 kg) de granulats propres et secs. Noter cette masse M.

2. Équipement : Le tambour Los Angeles :

L'appareil est un cylindre creux en acier, fermé aux deux extrémités, tournant autour d'un axe horizontal. Il possède une tablette intérieure longitudinale.

3. Procédure de l'essai :

- **Chargement** : Introduire les 5 kg de granulats dans le tambour.
- **Charge abrasive** : Ajouter la charge boulets (sphères d'acier d'environ 47 mm de diamètre). Pour la classe 10/14 mm, on introduit généralement **11 boulets** (masse totale entre 4690 et 4860 g).
- **Rotation** : Faire tourner le tambour à une vitesse constante (30 à 33 tr/min) pendant **500 tours** exactement.
- **Récupération** : Une fois les tours terminés, recueillir tout le matériau dans un bac placé sous la machine.

4. Traitement des résultats :

- **Tamissage de contrôle** : Tamiser le matériau obtenu sur le tamis de **1,6 mm**
- **Lavage** : Laver le refus (ce qui reste sur le tamis de 1,6 mm) pour éliminer les dernières poussières.
- **Séchage et Pesée** : Sécher le refus à l'étuve et peser la masse de granulats restants. Noter cette masse M'.

5. Calcul du coefficient Los Angeles (LA) :

Le coefficient LA représente le pourcentage de matériau broyé passant à travers le tamis de 1,6 mm

$$LA = \frac{M - M'}{M} \times 100$$

6. Valeurs usuelles de l'Essai Los Angeles :

Plus le coefficient LA est **faible**, plus le granulat est résistant aux chocs.

Tableau II-20 : Les Valeurs usuelles de l'Essai Los Angeles

Valeur du LA	Qualité du granulat	Usage type
LA < 15	Très dur	Couches de roulement à fort trafic, ballast ferroviaire.
15 < LA < 25	Dur	Bétons de structure haute résistance, routes.
25 < LA < 40	Moyennement dur	Bétons courants, fondations de chaussées.
LA > 40	Tendre / Fragile	Remblais, travaux de remplissage uniquement.

Formulation :

Soit **M** la masse initiale de l'échantillon soumis à l'essai et **m** la masse des éléments de dimension inférieure à 1,6 mm générés au cours de l'essai. La résistance à la fragmentation par chocs est exprimée à l'aide du coefficient Los Angeles (**LA**), défini par la relation suivante :

$$L_A = \frac{m}{M} \times 100$$

Ce coefficient traduit le pourcentage de fines produites lors de l'essai ; ainsi, plus la valeur du coefficient LA est faible, plus la résistance du granulat à la fragmentation est élevée.



Figure II-8 : Appareil pour essai Los Angeles

Tableau II-21 : Les résultats obtenus pour l'essai Los Angeles

Carrières	Coefficient Los Angeles LA
1. SARL O. OUALI	20.99
2. EURL S.L.I.G.O. S	28.85
3. SARL EL HILLAL	19.89

Les résultats de l'essai Los Angeles montrent que les granulats provenant des trois carrières possèdent une bonne résistance à la fragmentation sous l'effet des chocs et des frottements. La carrière SARL EL HILLAL présente la meilleure performance avec un coefficient LA de **19,89 %**, traduisant une faible dégradation des granulats lors de l'essai. Elle est suivie de la carrière SARL O. OUALI avec une valeur de 20,99 %, qui témoigne également d'une excellente résistance mécanique. En revanche, la carrière EURL S.L.I.G.O.S affiche le coefficient le plus élevé (28,85 %), indiquant une sensibilité plus importante à la fragmentation, tout en conservant des caractéristiques compatibles avec de nombreuses utilisations en génie civil. D'une manière générale, les valeurs obtenues restent relativement faibles, ce qui reflète la bonne qualité des granulats étudiés et leur aptitude à être utilisés dans les ouvrages routiers, les couches de chaussée et la fabrication du béton.

II.5.4.2. Essai Micro-Deval :

L'essai Micro-Deval a pour objectif d'évaluer la résistance des granulats à la fragmentation ainsi qu'à l'usure par frottement réciproque, en présence d'eau. Cet essai est réalisé conformément aux prescriptions de la norme **NF P 18-573**. Le principe de cet essai consiste à soumettre un échantillon de granulats, placé dans un cylindre métallique rotatif, à l'action combinée de charges abrasives (billes en acier) et d'une quantité déterminée d'eau. Sous l'effet des rotations successives du cylindre, les granulats subissent des chocs et des frottements mutuels, entraînant une dégradation progressive du matériau. À l'issue de l'essai, le matériau est tamisé, et la masse des éléments fins passant au tamis de **1,6 mm** est mesurée. Cette valeur permet de calculer le **coefficient Micro-Deval (MDE)**, qui constitue un indicateur représentatif de la résistance à l'usure et à l'abrasion des granulats. Pour les granulats susceptibles d'être exposés aux effets du gel, il est également possible de déterminer le coefficient Micro-Deval après une série de **25 cycles** de gel-dégel, réalisés dans un intervalle thermique compris entre **-25 °C** et **+25 °C**. La valeur obtenue est ensuite comparée au coefficient de référence, afin d'évaluer l'influence des cycles thermiques sur la durabilité du matériau. En fonction des résultats obtenus, les granulats sont classés en six catégories distinctes, allant de A à F, chacune correspondant à des exigences spécifiques en termes de résistance mécanique et de durabilité, conformément aux critères définis par les normes en vigueur.

$$\text{MDE} = 100 \times \frac{500 - m'}{500}$$



Figure II-9 : Appareil pour Essai Micro-Deval

Tableau II-22 : Les résultats obtenus pour l'essai Micro-Deval

Carrière	Coefficient Micro Deval M_{DE}
1. SARL O. OUALI	19.60
2. EURL S.L.I.G.O. S	21.16
3. SARL EL HILLAL	17.26

Les résultats de l'essai Micro-Deval montrent que les granulats issus des trois carrières présentent une bonne résistance à l'usure par abrasion en présence d'eau. La carrière SARL EL HILLAL enregistre la valeur de MDE la plus faible (17,26 %), indiquant la meilleure résistance à l'usure parmi les matériaux étudiés. Elle est suivie par la carrière SARL O. OUALI avec un coefficient de 19,60 %, qui traduit également un comportement satisfaisant. La carrière EURL S.L.I.G.O.S présente la valeur la plus élevée (21,16 %), révélant une résistance légèrement inférieure à l'abrasion, tout en restant dans une plage acceptable pour de nombreuses applications en génie civil.

Globalement, les faibles valeurs obtenues témoignent de la bonne qualité mécanique des granulats provenant de ces carrières et de leur aptitude à être utilisés dans les couches de chaussée et la fabrication du béton.

NB:

La comparaison des résultats des essais Los Angeles et Micro-Deval montre que la carrière SARL EL HILLAL présente les meilleures performances mécaniques globales, avec les plus faibles coefficients LA (19,89 %) et MDE (17,26 %). À l'inverse, la carrière EURL S.L.I.G.O.S enregistre les valeurs les plus élevées pour les deux essais (LA = 28,85 % ; MDE = 21,16 %), traduisant une résistance légèrement inférieure aux chocs et à l'usure. La carrière SARL O. OUALI occupe une position intermédiaire avec des performances satisfaisantes dans les deux essais.

II.6. Conclusion:

À l'issue des analyses granulométriques, physico-chimiques et mécaniques, il est possible d'évaluer la qualité globale des granulats étudiés. Un point commun observé entre les différents sables et leur propreté apparente, mise en évidence par des valeurs relativement alarmante de l'essai au Bleu de méthylène pour les deux carriers SARL O OAUALI et EURL SLIGOS tandis que les valeurs sont assez concluantes pour la carrier SARL EL HILLAL.

Les résultats de l'essai d'Équivalent de sable indiquent de bonnes valeurs notamment pour les carrière SARL EL HILAL et SARL O. OUALI, en revanche pour la carrière de EURL SLIGOS équivalent de sable est faible ce qui peut traduire par la présence de fines argileuses ou limoneuses en proportion non négligeable.

Par ailleurs, l'analyse granulométrique révèle une distribution relativement homogène des grains pour la majorité des échantillons, traduisant une bonne régularité de la granularité.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, notamment la résistance aux chocs évaluée par l'essai de Los Angeles, les graviers présentent globalement de bonnes performances.

CHAPITRE III

ANALYSE DU CIMENT UTILISÉ ET ÉTUDE DE LA COMPOSITION DU BÉTON

III.1. Généralités sur le béton :

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde en raison de ses bonnes performances mécaniques, de sa durabilité et de son coût relativement faible. Il est employé dans la réalisation de nombreux ouvrages tels que les bâtiments, les ponts, les barrages et les chaussées. Les propriétés du béton dépendent principalement de la nature et de la qualité de ses constituants ainsi que de leur proportion dans le mélange.

III.1.2. Constituants du béton :

Les principaux constituants du béton sont :

- **Le ciment** : liant hydraulique assurant la cohésion du matériau.
- **L'eau** : indispensable à l'hydratation du ciment et à l'obtention de l'ouvrabilité souhaitée.
- **Les granulats** : constitués de sable et de gravier, ils représentent la plus grande partie du volume du béton.
- **Les adjuvants et additions** : produits incorporés en faible quantité afin d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais ou durci.

III.1.3. Principe de formulation du béton :

La formulation du béton consiste à déterminer les proportions optimales de ses différents constituants afin d'obtenir les performances recherchées en termes de résistance mécanique, d'ouvrabilité, de durabilité et d'économie. Cette opération vise également à assurer une bonne compacité du squelette granulaire tout en limitant les vides dans le mélange.

III.1.4. Avantages et inconvénients du béton :

Avantages :

- Bonne résistance à la compression.
- Grande durabilité lorsqu'il est correctement formulé.
- Facilité de mise en œuvre et de moulage.
- Disponibilité des matériaux constitutifs.
- Coût relativement économique.

Inconvénients :

- Faible résistance à la traction.
- Risque de fissuration dû au retrait ou aux variations thermiques.
- Poids propre élevé.
- Sensibilité à certains agents agressifs en l'absence de protection adaptée.

III.1.5. Importance du ciment dans le béton :

Le ciment joue un rôle fondamental dans le comportement du béton. En présence d'eau, il développe des réactions chimiques qui conduisent à la formation d'une pâte durcie assurant la liaison entre les granulats. La qualité, la composition et la quantité de ciment influencent directement les résistances mécaniques, la durabilité et les propriétés physiques du béton.

III.2. Généralités sur le ciment :

Le ciment est le principal liant utilisé dans la fabrication du béton et des mortiers. Grâce à ses propriétés hydrauliques, il est capable de faire prise et de durcir même en présence d'eau. Son utilisation constitue aujourd'hui un élément essentiel dans le domaine du génie civil et de la construction.

III.2.1. Définition du ciment :

Le ciment est un liant hydraulique obtenu par broyage du clinker avec une quantité déterminée de gypse et, selon le type de ciment, avec diverses additions minérales. Mélangé à l'eau, il forme une pâte qui fait prise puis durcit progressivement en développant des résistances mécaniques importantes.

III.2.2. Historique et évolution du ciment :

L'utilisation de matériaux cimentaires remonte à l'Antiquité, notamment chez les Romains qui employaient des mélanges à base de chaux et de pouzzolanes. Le ciment moderne a été développé au XIXe siècle avec l'invention du ciment Portland par Joseph Aspdin en 1824. Depuis lors, les procédés de fabrication ont considérablement évolué afin d'améliorer les performances techniques et de réduire l'impact environnemental de la production.

III.2.3. Rôle du ciment dans les matériaux cimentaires :

Le ciment assure la cohésion des différents constituants du béton et du mortier. Lors de son hydratation, il forme des composés qui confèrent au matériau sa résistance et sa durabilité. Il influence également plusieurs propriétés telles que le temps de prise, la résistance mécanique, la perméabilité et le comportement à long terme des ouvrages.

III.3. Constituants principaux du ciment et additions minérales :

Le ciment est principalement constitué de clinker auquel sont ajoutés du gypse et, selon le type de ciment recherché, diverses additions minérales. Ces constituants permettent d'améliorer certaines propriétés du ciment tout en réduisant parfois la quantité de clinker utilisée. Les principales additions minérales sont le laitier granulé de haut fourneau, les cendres volantes, les pouzzolanes naturelles ou artificielles ainsi que les fillers calcaires. Leurs caractéristiques et leurs rôles seront présentés dans les sections suivantes.

III.3.1. Clinker :

Le clinker est obtenu par la cuisson à haute température d'un mélange homogène de calcaire et d'argile, préalablement dosé de manière appropriée. Cette cuisson est poursuivie jusqu'à atteindre une fusion partielle du mélange, dont les principaux constituants chimiques sont la chaux (CaO), la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3).

Généralement, ce mélange est élaboré à partir de matières premières naturelles extraites des carrières, telles que les calcaires, les argiles et les marnes. Après refroidissement, le clinker est broyé en présence d'une faible quantité de sulfate de calcium (gypse), qui joue le rôle de régulateur de prise, permettant ainsi d'obtenir le ciment Portland, auquel il confère ses propriétés caractéristiques.

Le clinker est constitué principalement de quatre composés minéralogiques essentiels, à savoir :

- Le silicate tricalcique (C_3S) — $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: représente environ 50 à 70 % du clinker.
- Le silicate bicalcique (C_2S) — $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: représente environ 10 à 30 % du clinker.
- L'aluminate tricalcique (C_3A) — $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$: représente environ 2 à 15 % du clinker.
- L'alumino-ferrite tétracalcique (C_4AF) — $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$: représente environ 5 à 15 % du clinker.

En plus de ces constituants majeurs, le clinker contient également de faibles quantités d'autres composés présents sous forme de solutions solides ou intégrés dans des combinaisons complexes, tels que les alcalins (Na_2O et K_2O), la magnésie (MgO) ainsi que des traces de divers métaux.

Il convient de noter que la teneur en alcalins et en magnésie doit rester limitée, car une concentration élevée de ces éléments peut avoir une influence défavorable sur la stabilité dimensionnelle et la durabilité du ciment durci.

À l'aide de l'observation au microscope, il est possible de distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases principales, désignées comme suit :

- Phase A — Alite : phase cristallisée se présentant sous forme de cristaux polygonaux relativement grands, généralement anguleux et foncés, d'une taille moyenne d'environ 50 μm .
- Phase B — Bélite : phase généralement présente sous forme impure dans le clinker, caractérisée par des grains légèrement arrondis et striés.
- Phase C — Célide : phase vitreuse légèrement foncée ou claire, apparaissant sous forme impure dans la matrice du clinker.

III.3.2. Laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier granulé de haut fourneau est un sous-produit issu de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux, à partir du minerai de fer et du coke métallurgique. Il est évacué par le trou de coulée à une température élevée, généralement de l'ordre de 1500 °C. Après sa sortie du haut fourneau, le laitier subit un refroidissement brusque, généralement par trempe à l'eau, ce qui entraîne sa vitrification et la formation d'un produit granulé possédant des propriétés hydrauliques latentes. Ce matériau est ensuite ajouté au clinker en proportions variables, puis broyé finement avec celui-ci afin d'obtenir certains types de ciments, notamment les ciments au laitier. Sur le plan chimique, le laitier granulé de haut fourneau est principalement constitué de :

- Chaux (**CaO**) : environ **45 à 50 %**
- Silice (**SiO₂**) : environ **25 à 30 %**
- Alumine (**Al₂O₃**) : environ **15 à 20 %**
- Magnésie (**MgO**) et autres oxydes (oxydes divers et manganèse) : environ **10 %**

L'incorporation du laitier granulé dans le ciment contribue à améliorer certaines propriétés, telles que la résistance mécanique à long terme, la durabilité et la résistance aux milieux agressifs, tout en permettant une réduction de la chaleur d'hydratation et de la consommation de clinker.

III.3.3. Cendres volantes :

Les cendres volantes sont des matériaux pulvérulents de très grande finesse, issus du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques fonctionnant au charbon. Elles constituent un sous-produit industriel couramment valorisé dans la fabrication des ciments composés. On distingue principalement deux types de cendres volantes :

- Les cendres volantes siliceuses (type V) : elles présentent essentiellement des propriétés pouzzolaniques, ce qui leur permet de réagir avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment pour former des composés cimentaires supplémentaires.
- Les cendres volantes calciques (type W) : elles possèdent des propriétés hydrauliques et, dans certains cas, également des propriétés pouzzolaniques, en raison de leur teneur plus élevée en calcium.

Les cendres volantes sont incorporées dans certains types de ciments en proportions variables, généralement comprises entre **5 % et 30 %**. Elles sont ajoutées lors de l'étape de broyage du clinker, afin de contribuer à l'obtention d'un ciment aux propriétés améliorées, notamment en termes de maniabilité, de durabilité et de réduction de la chaleur d'hydratation.

III.3.4. Pouzzolanes :

Les pouzzolanes sont des matériaux d'origine naturelle, généralement issus de formations volcaniques. Elles sont principalement constituées de silice (**SiO₂**), d'alumine (**Al₂O₃**) et d'oxydes de fer (**Fe₂O₃**). Dans l'industrie cimentaire, les pouzzolanes sont utilisées en raison de leurs propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire leur capacité à réagir, à température ambiante, avec la chaux (**Ca (OH)₂**) libérée lors de l'hydratation du ciment. Cette réaction permet la formation de composés à caractère hydraulique, capables de faire prise et de durcir par hydratation, contribuant ainsi à l'amélioration des performances mécaniques et de la durabilité des matériaux cimentaires. Il est également possible de produire des pouzzolanes artificielles par traitement thermique de certaines matières premières, notamment les argiles cuites, qui développent des propriétés pouzzolaniques similaires à celles des matériaux naturels.

III.3.5. Fillers calcaires :

Les **fillers** sont considérés comme des **constituants secondaires** des ciments. Leur teneur est limitée et ne doit en aucun cas dépasser **5 % en masse** dans la composition du ciment.

Il s'agit de matières minérales, d'origine naturelle ou artificielle, qui n'interviennent pas directement dans les réactions chimiques d'hydratation, mais agissent principalement par leur effet physique lié à la granulométrie.

L'incorporation des fillers permet d'améliorer certaines propriétés des liants hydrauliques, notamment :

- L'augmentation de la **maniabilité** des bétons et mortiers,
- L'amélioration du **pouvoir de rétention d'eau**,
- La réduction de la **perméabilité** et de la **capillarité**,
- Ainsi qu'une diminution du risque de **fissuration**.

Ainsi, les fillers contribuent à optimiser les performances physiques du ciment, en améliorant sa compacité et son comportement à l'état frais et durci.

Autres constituants

Il existe également d'autres constituants secondaires ou additions utilisées dans la fabrication des ciments, contribuant à l'amélioration de leurs propriétés physico-mécaniques et de leur durabilité.

• Schistes calcinés

Les **schistes calcinés** sont obtenus par traitement thermique de schistes naturels portés à une température d'environ **800 °C** dans un four spécifique. Après broyage fin, ces matériaux présentent à la fois des propriétés **hydrauliques** et **pouzzolaniques**, ce qui leur permet de participer aux réactions d'hydratation du ciment et d'améliorer ses performances mécaniques.

- **Fumée de silice**

La **fumée de silice** est un sous-produit issu de l'industrie de production du silicium et de ses alliages. Elle est constituée de particules sphériques extrêmement fines, dont le diamètre est de l'ordre de **0,1 μm** .

Lorsqu'elle est utilisée comme constituant principal du ciment, sa teneur doit être d'au moins **85 % en masse**. Grâce à sa très grande finesse et à sa forte réactivité, la fumée de silice présente d'excellentes propriétés **pouzzolaniques**, améliorant significativement la **compacité**, la **résistance mécanique** et la **durabilité** des bétons.

- **Calcaire**

Le **calcaire** est une roche sédimentaire riche en carbonate de calcium (CaCO_3). Finement broyé, il est utilisé comme **addition minérale** dans certains ciments afin d'améliorer la **granulométrie**, la **maniabilité** et de réduire la consommation de clinker.

- **Sulfate de calcium**

Le **sulfate de calcium**, généralement sous forme de **gypse** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), est incorporé lors du broyage du clinker. Il joue un rôle essentiel de **régulateur de prise**, en contrôlant la vitesse d'hydratation des aluminates et en évitant une prise trop rapide du ciment.

III.4. Principe de fabrication du ciment Portland :

La fabrication du ciment Portland peut être schématiquement décomposée en trois étapes principales :

- Préparation du cru
- Cuisson
- Broyage et conditionnement

1. Méthodes de fabrication

La production du ciment peut être réalisée selon quatre procédés, dépendant principalement de la nature des matières premières et de leur traitement :

- Voie humide : méthode la plus ancienne.
- Voie semi-humide : dérivée de la voie humide.
- Voie sèche : méthode la plus utilisée actuellement en raison de son efficacité énergétique.
- Voie semi-sèche : dérivée de la voie sèche.

2. Composition de base du ciment

Les ciments modernes sont essentiellement constitués d'un mélange de silicates et d'aluminates de calcium, résultant de la combinaison de la chaux (**CaO**) avec la silice (**SiO_2**), l'alumine (**Al_2O_3**) et l'oxyde de fer (**Fe_2O_3**).

La chaux est apportée principalement par les roches calcaires, tandis que la silice, l'alumine et l'oxyde de fer proviennent des argiles. Les matières premières naturelles utilisées sont donc principalement le calcaire, l'argile et la marne, lesquelles contiennent également d'autres oxydes minéraux, notamment l'oxyde ferrique.

3. Principe général de fabrication

Le processus de fabrication du ciment repose sur les étapes suivantes : les matières premières (calcaire et argile) sont extraites des carrières, puis concassées, homogénéisées et dosées avant d'être introduites dans un four où elles sont portées à haute température, généralement comprise entre **1450** et **1550 °C**.

Après cuisson, le produit obtenu est rapidement refroidi (procédé de trempe) afin de former le clinker, constituant de base du ciment Portland.

4. Transformations physico-chimiques lors de la cuisson

Au cours du chauffage du mélange calcaire–argile, plusieurs transformations successives se produisent :

- Élimination de l'eau libre à basse température ;
- Déshydratation progressive de l'eau combinée au-delà de **100 °C** ;
- À partir d'environ **400 °C**, décomposition du carbonate de calcium (**CaCO₃**) avec dégagement de **CO₂** et formation de **CaO** ;
- À haute température, entre 1450 et 1550 °C, formation d'une phase liquide permettant les réactions de combinaison des oxydes.

5. Formation des composés du clinker

On considère que la formation des phases du ciment s'effectue de la manière suivante :

- Une partie de la chaux (**CaO**) se combine avec l'alumine (**Al₂O₃**) et l'oxyde de fer (**Fe₂O₃**) pour former une phase liquide intermédiaire ;
- La silice (**SiO₂**) réagit ensuite avec la chaux pour former le silicate bicalcique (**C₂S**) ;
- Une partie de ce dernier se transforme en silicate tricalcique (**C₃S**) lorsque la quantité de **CaO** disponible reste suffisante.

Ces réactions successives conduisent à la formation des principaux constituants minéralogiques du clinker, responsables des propriétés mécaniques et de la résistance du ciment Portland.

III.4.1. Fabrication du ciment par voie humide :

La fabrication du ciment par voie humide constitue l'un des procédés les plus anciens utilisés dans l'industrie cimentière. Cette méthode se caractérise par sa simplicité de mise en œuvre, bien qu'elle présente une consommation énergétique relativement élevée par rapport aux procédés modernes. Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont préalablement dosés, puis finement broyés en présence d'une quantité importante d'eau afin d'obtenir une pâte homogène appelée **pâte crue**, contenant

généralement entre **28 % et 42 % d'eau**. Cette pâte est soumise à un brassage intensif dans de grands bassins circulaires, d'un diamètre compris entre **8 et 10 mètres**, équipés de dispositifs mécaniques tels que des herse rotatives assurant une homogénéisation efficace du mélange. Après cette première étape, la pâte obtenue est transférée vers de vastes bassins de stockage, pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres cubes, dans lesquels elle est continuellement malaxée afin d'assurer une homogénéité chimique optimale. Ce mélange homogénéisé constitue le **cru**. Des analyses chimiques régulières sont effectuées afin de vérifier la composition du cru et d'apporter, le cas échéant, les corrections nécessaires avant son introduction dans le four de cuisson. La pâte crue est ensuite acheminée vers un **four rotatif incliné**, constitué d'un cylindre en acier dont la longueur peut atteindre **200 mètres**. Le chauffage est assuré par une flamme située à l'extrémité inférieure du four. À l'intérieur de ce dernier, plusieurs zones thermiques successives sont distinguées, dont les principales sont :

- **La zone de séchage**, représentant environ **20 % de la longueur totale du four**, où l'eau contenue dans la pâte s'évapore progressivement. Les parois de cette zone sont généralement équipées de chaînes métalliques permettant d'augmenter la surface d'échange thermique et d'améliorer l'efficacité du séchage.
- **La zone de décarbonatation**, dans laquelle se produit la décomposition thermique du carbonate de calcium (CaCO_3), entraînant la libération du dioxyde de carbone (CO_2) et la formation d'oxyde de calcium (CaO).
- **La zone de clinkerisation**, caractérisée par des températures élevées, où les réactions chimiques conduisent à la formation des principaux constituants minéralogiques du clinker.

À la sortie du four, le **clinker**, dont la température est comprise entre **600 °C et 1200 °C**, est dirigé vers des dispositifs de refroidissement appelés **refroidisseurs de clinker**, dont il existe plusieurs types, notamment les refroidisseurs à grille et à ballonnets. La vitesse de refroidissement constitue un paramètre essentiel influençant la formation des phases vitreuses et, par conséquent, les propriétés finales du clinker. Indépendamment de la méthode de fabrication utilisée, le clinker obtenu doit ensuite subir une opération de **broyage fin**, réalisée en présence d'environ **4 % à 5 % de gypse (CaSO_4)**. L'ajout du gypse a pour fonction principale de réguler le temps de prise du ciment et d'améliorer certaines de ses propriétés mécaniques. Le broyage est généralement effectué à l'aide de **broyeurs à boulets**, constitués de cylindres métalliques disposés horizontalement et partiellement remplis de boulets en acier. Ces broyeurs tournent à une vitesse d'environ **20 tours par minute**, permettant la fragmentation progressive des nodules de clinker. Toutefois, cette opération reste énergétiquement coûteuse en raison de la grande dureté du clinker et du rendement limité des dispositifs de broyage.

Deux modes de broyage peuvent être distingués :

- **Le broyage en circuit ouvert**, dans lequel le clinker traverse une seule fois le broyeur.
- **Le broyage en circuit fermé**, où le produit broyé est soumis à une classification dans un cyclone séparateur, permettant le recyclage des particules grossières vers le broyeur afin d'améliorer l'efficacité du processus.

À la sortie du broyeur, le ciment atteint généralement une température d'environ **160 °C**. Avant son transfert vers les silos de stockage, il est nécessaire de le refroidir à l'aide d'un **refroidisseur centrifuge**, permettant d'abaisser sa température jusqu'à environ **65 °C**, garantissant ainsi des conditions optimales de stockage et de conservation.

III.4.2. Fabrication du ciment par voie sèche :

La fabrication du ciment par voie sèche constitue aujourd'hui la méthode la plus utilisée dans l'industrie cimentière moderne, en raison de sa faible consommation énergétique.

Les ciments usuels sont généralement élaborés à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) représentant environ 80 %, et d'argile, riche en silice (SiO_2) et alumine (Al_2O_3), représentant environ 20 %. Selon la nature et l'origine des matières premières disponibles, la composition du mélange peut être corrigée par l'ajout de certains constituants secondaires tels que la bauxite, l'oxyde de fer ou d'autres matériaux apportant le complément nécessaire en alumine et en silice, afin d'obtenir une composition chimique conforme aux exigences de fabrication du clinker.

Après un broyage fin des matières premières, la poudre obtenue, appelée farine crue, est transportée depuis le silo d'homogénéisation vers le système de cuisson. Ce transport est assuré soit par pompage pneumatique, soit par aéroglesseurs, permettant un déplacement continu et contrôlé de la matière.

Le système de cuisson utilisé dans la voie sèche est constitué de deux parties principales :

- Un four vertical fixe, appelé préchauffeur, composé d'une série de cyclones échangeurs de chaleur.
- Un four rotatif, analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais généralement plus court, grâce à l'efficacité thermique du préchauffage.

Dans le préchauffeur, les gaz chauds issus du four circulent en sens inverse du flux de la poudre crue, créant ainsi un échange thermique à contre-courant. Sous l'effet de cette circulation, la farine crue se réchauffe progressivement jusqu'à une température avoisinante 800 °C, entraînant l'élimination de l'humidité résiduelle ainsi que la décarbonatation partielle, caractérisée par la libération du dioxyde de carbone (CO_2).

La poudre préchauffée pénètre ensuite dans le four rotatif, où se poursuivent les réactions chimiques à haute température conduisant à la formation du clinker, selon un processus similaire à celui observé dans la voie humide, mais avec une durée de séjour plus courte.

Malgré ses nombreux avantages, la fabrication par voie sèche soulève plusieurs contraintes techniques importantes, parmi lesquelles :

a). Problème de ségrégation des constituants :

La ségrégation potentielle entre les particules d'argile et de calcaire dans les préchauffeurs constitue une préoccupation technique majeure. En effet, les systèmes cycloniques sont généralement utilisés dans d'autres domaines pour le tri granulométrique des particules. Toutefois, dans le cas de la fabrication du ciment, ce phénomène reste limité, car l'argile et le calcaire présentent des densités voisines, de l'ordre de 2,70 g/cm³. Par ailleurs, la conception spécifique des équipements ainsi que les mesures de contrôle adoptées permettent de maintenir une homogénéité satisfaisante du mélange.

b). Problème des émissions de poussières :

La production de poussières constitue l'un des principaux défis environnementaux associés à la voie sèche. Ce problème est d'autant plus important que les réglementations environnementales imposent des normes strictes en matière d'émissions atmosphériques.

Afin de limiter ces nuisances, les cimenteries sont équipées de dépoussiéreurs électrostatiques, constitués de grilles métalliques soumises à une haute tension électrique. Sous l'effet du champ électrique, les particules de poussière se chargent électriquement et viennent se fixer sur les électrodes. Ces particules s'agglomèrent progressivement puis sont détachées grâce à des systèmes vibrants, retombant au fond du dispositif où elles sont récupérées et réintroduites dans le circuit de fabrication.

En conditions normales de fonctionnement, ces dispositifs présentent un rendement pouvant atteindre 99 %, bien qu'ils représentent un investissement important dans le coût global d'installation d'une cimenterie.

c). Problème de l'homogénéité du cru :

Le maintien de l'homogénéité chimique de la farine crue constitue une condition essentielle pour assurer la qualité du clinker produit. Ce problème est généralement résolu grâce à une pré-homogénéisation des matières premières, suivie d'une homogénéisation finale dans des silos spécialement conçus, garantissant une distribution uniforme des constituants chimiques.

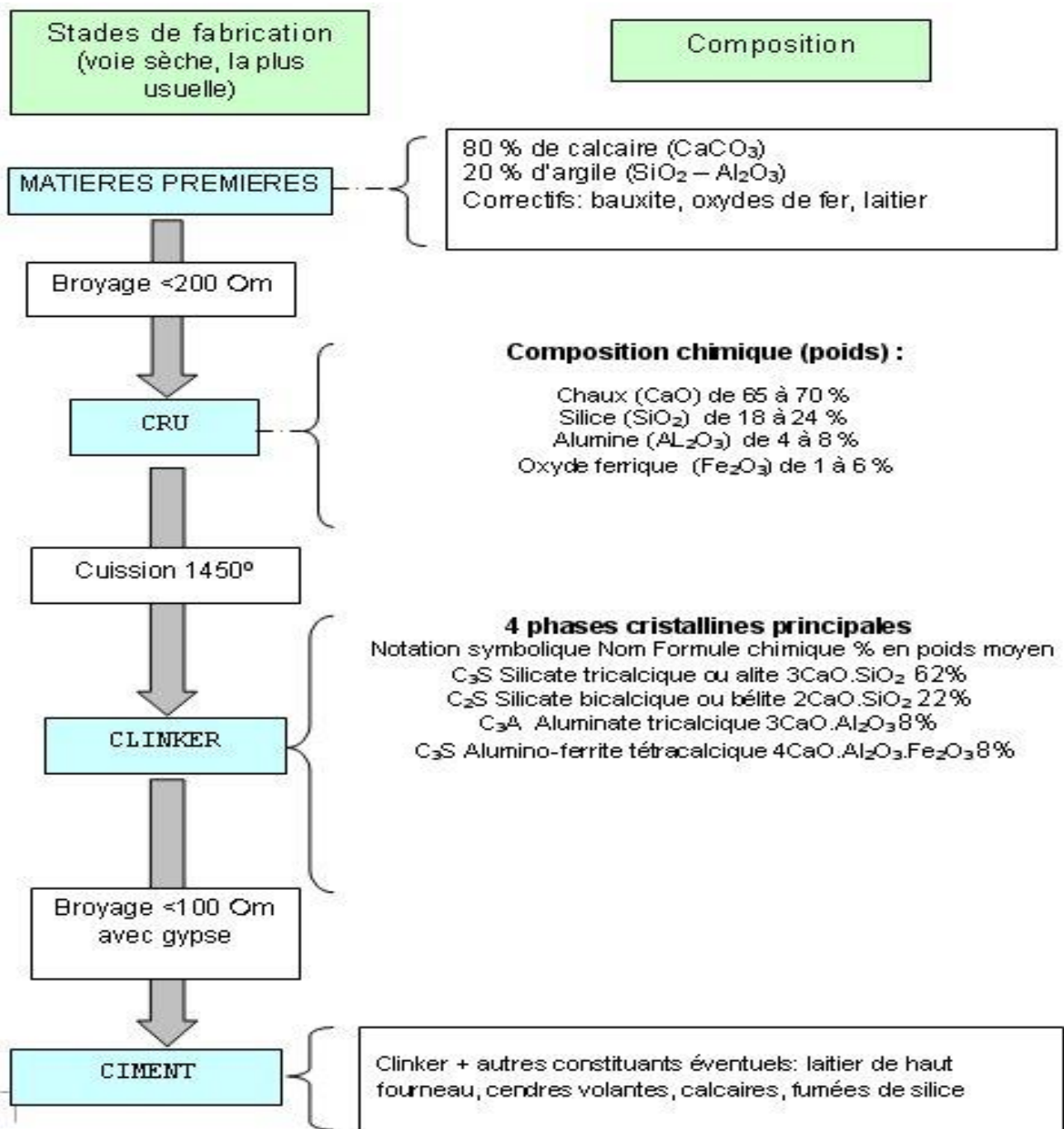


Figure III-1 : Le schéma de la fabrication du ciment

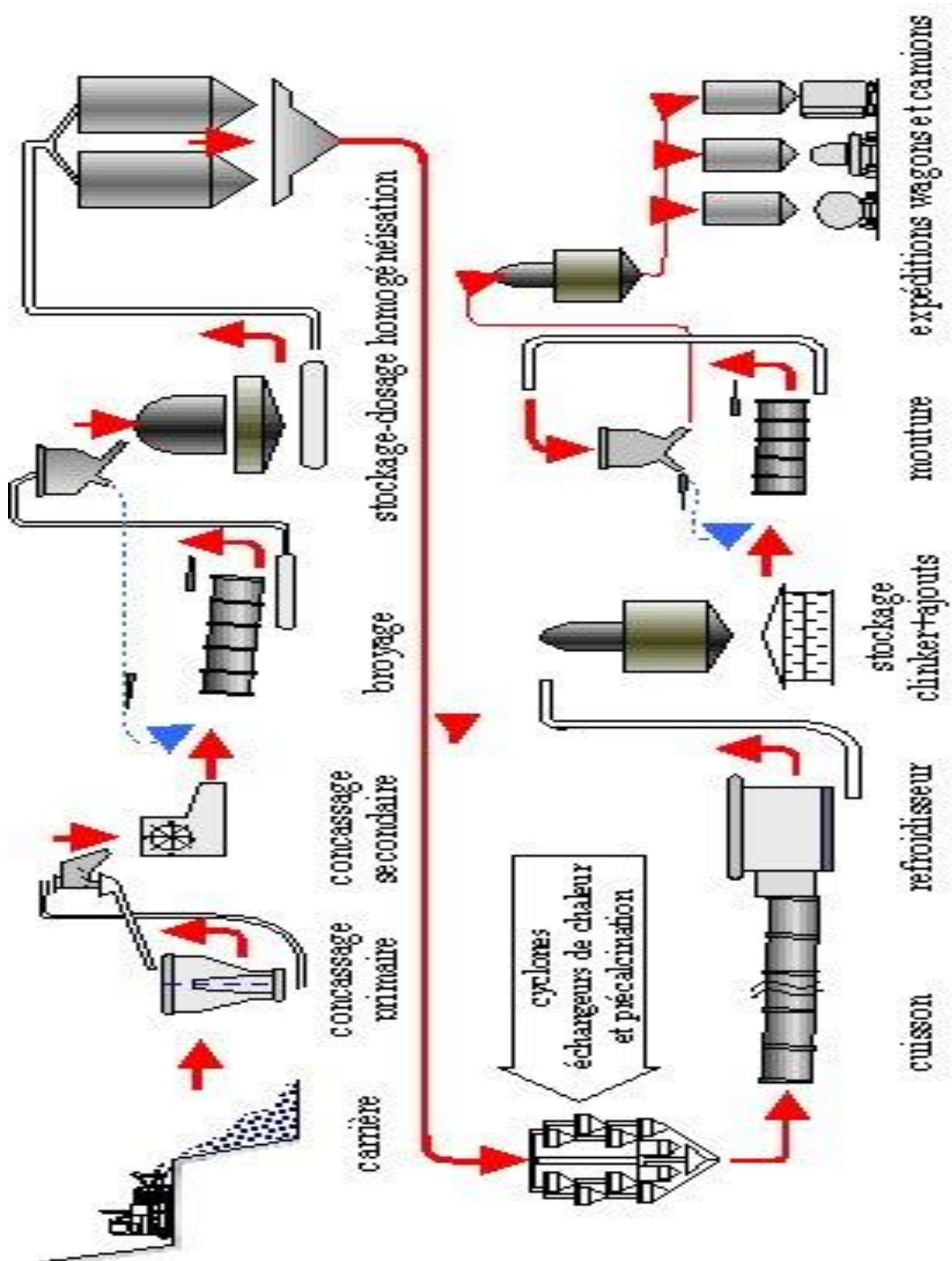


Figure III-2 : Fabrication du ciment

III.5. Différents types de ciment :

Les ciments peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment leur composition chimique et leur résistance mécanique normale. Cette classification est définie par les normes européennes et françaises, notamment la norme NF P 15-301 et la norme EN 197-1, qui établissent les différentes catégories de ciments en fonction de la nature et des proportions des constituants principaux et secondaires.

III.5.1. Classification des ciments en fonction de leur composition :

Selon les normes NF P 15-301 et EN 197-1, les ciments constitués principalement de clinker et d'autres constituants minéraux sont classés en cinq types principaux, désignés par l'abréviation CEM suivie d'un chiffre romain allant de I à V. La correspondance avec l'ancienne notation française est indiquée entre parenthèses. Les principaux types de ciment sont les suivants :

- CEM I : Ciment Portland (CPA)

Il est constitué essentiellement de clinker, avec une faible proportion de constituants secondaires. Ce type de ciment est largement utilisé pour les ouvrages courants nécessitant une résistance mécanique élevée.

- CEM II : Ciment Portland composé (CPJ)

Il contient, en plus du clinker, une proportion modérée de constituants additionnels tels que le laitier granulé, les cendres volantes ou les fillers calcaires.

- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF)

Ce ciment contient une proportion importante de laitier granulé de haut fourneau, ce qui lui confère une bonne durabilité, notamment en milieu agressif.

- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ)

Il est caractérisé par l'incorporation de pouzzolanes naturelles ou artificielles, améliorant sa résistance chimique et sa durabilité à long terme.

- CEM V : Ciment composé au laitier et aux cendres (CLC)

Ce type de ciment contient simultanément du laitier granulé et des cendres volantes, ce qui améliore ses performances mécaniques et sa durabilité.

La proportion massique des différents constituants varie selon le type de ciment. Les constituants marqués par un astérisque (*) sont considérés comme constituants secondaires, et leur proportion totale ne doit pas dépasser 5 % de la masse totale. Les fillers calcaires sont également considérés comme des constituants secondaires dans cette classification.

Tableau III-1 : Classification des ciments selon la norme EN 197-1

Type de ciment	Désignation européenne	Désignation française	Constituants principaux	Domaine d'utilisation général
CEM I	Ciment Portland	CPA	Clinker ($\geq 95\%$)	Ouvrages courants, béton armé
CEM II	Ciment Portland composé	CPJ	Clinker + ajouts (laitier, cendres, fillers)	Bétons courants
CEM III	Ciment de haut fourneau	CHF	Laitier granulé + clinker	Milieus agressifs, ouvrages hydrauliques
CEM IV	Ciment pouzzolanique	CPZ	Clinker + pouzzolanes	Ouvrages massifs, milieux chimiques
CEM V	Ciment composé	CLC	Clinker + laitier + cendres volantes	Structures nécessitant durabilité élevée

III.5.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance :

Les ciments sont également classés selon leurs résistances mécaniques, déterminées principalement par la résistance à la compression à 28 jours, qui constitue la référence standard pour l'évaluation des performances mécaniques des ciments. Selon les exigences de la norme EN 197-1, trois classes de résistance normales sont définies en fonction de la résistance mécanique mesurée à 28 jours. Ces classes correspondent à des niveaux croissants de résistance mécanique et sont désignées comme suit :

- Classe 32,5
- Classe 42,5
- Classe 52,5

En complément de ces classes principales, des sous-classes identifiées par la lettre R (Résistance initiale élevée) peuvent être associées à chacune des classes. Ces sous-classes désignent des ciments présentant des résistances mécaniques élevées à jeune âge, généralement mesurées à 2 jours, permettant ainsi un décoffrage rapide et une mise en service anticipée des ouvrages.

Les différentes classes de résistance doivent respecter les spécifications normatives relatives aux résistances minimales garanties à court et à long terme. Les valeurs indiquées entre parenthèses dans les tableaux normatifs correspondent aux valeurs garanties, qui peuvent, dans certains cas, être légèrement inférieures aux valeurs spécifiées nominales.

Tableau III-2 : Classes de résistance des ciments selon EN 197-1

Classe de résistance	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance à 28 jours (MPa)	Désignation complète possible
32,5 N	≥ 10	32,5 à 52,5	CEM I 32,5 N
32,5 R	≥ 16	32,5 à 52,5	CEM II 32,5 R
42,5 N	≥ 10	42,5 à 62,5	CEM I 42,5 N
42,5 R	≥ 20	42,5 à 62,5	CEM II 42,5 R
52,5 N	≥ 20	$\geq 52,5$	CEM I 52,5 N
52,5 R	≥ 30	$\geq 52,5$	CEM I 52,5 R

Tableau III-3 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition

	Cim. Port-land	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendre siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤50%
Fumée de silice (D)	*	(fumée de	(fumée de	*	*	*			*	*
Cendres calciques (W)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*			*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

III.6. Présentation du ciment utilisé dans cette étude

Dans le cadre de cette étude, le ciment utilisé est un ciment Portland composé de type CEM II. Ce ciment est largement employé dans le domaine du bâtiment et des travaux publics en raison de ses bonnes performances mécaniques, de sa durabilité et de sa disponibilité sur le marché national.

III.6.1. Définition du ciment Portland composé CEM II

Le ciment Portland composé (CEM II) est un ciment obtenu par broyage de clinker Portland avec une proportion déterminée d'additions minérales telles que les fillers calcaires, les pouzzolanes ou le laitier granulé de haut fourneau. Selon la norme EN 197-1, la teneur en clinker est comprise entre 65 % et 94 %, le reste étant constitué d'additions et de gypse.

III.6.2. Composition chimique et minéralogique du CEM II

La composition chimique du ciment CEM II est dominée par les oxydes de calcium (CaO), de silicium (SiO_2), d'aluminium (Al_2O_3) et de fer (Fe_2O_3). Sa composition minéralogique est principalement constituée de silicates de calcium (C_3S et C_2S), d'aluminates tricalciques (C_3A) et d'aluminoferrites tétracalciques (C_4AF). La présence d'additions minérales contribue à améliorer certaines propriétés du ciment tout en réduisant la consommation de clinker.

III.6.3. Caractéristiques physiques et mécaniques du CEM II

Le ciment CEM II présente une finesse de mouture adaptée au développement des résistances mécaniques, un temps de prise compatible avec les conditions courantes de mise en œuvre et une bonne stabilité volumique. Ses résistances mécaniques à court et à long terme répondent aux exigences des ouvrages de construction courants. Il offre également une bonne durabilité face aux conditions environnementales habituelles.

III.6.4. Domaines d'utilisation du CEM II

Le ciment CEM II est utilisé dans la fabrication des bétons armés, des bétons ordinaires, des mortiers, des éléments préfabriqués ainsi que dans les travaux de maçonnerie et de génie civil. Grâce à sa polyvalence, il convient à la majorité des ouvrages de construction courante nécessitant des performances mécaniques normales.

III.6.5. Justification du choix du CEM II pour cette étude

Le choix du ciment CEM II dans cette étude est motivé par plusieurs raisons. Tout d'abord, il s'agit d'un ciment à performances normales largement utilisé dans la région pour la fabrication des bétons de construction courante. De plus, le CEM II constitue le type de ciment le plus répandu dans la wilaya de Saïda, ce qui permet d'assurer une meilleure représentativité des résultats obtenus par rapport aux pratiques locales. Aussi, ce ciment est le principal produit fabriqué par la cimenterie d'El Hassasna (wilaya de Saïda), garantissant ainsi sa disponibilité et son utilisation fréquente dans les projets de construction de la région.

Enfin ; l'utilisation du ciment CEM II permet d'obtenir des résultats expérimentaux représentatifs des conditions réelles de production et d'utilisation des bétons dans la région de Saïda.

III.7. Essais en laboratoire sur le ciment :

Les essais réalisés en laboratoire sur le ciment ont pour objectif de déterminer les principales propriétés physiques et mécaniques caractérisant un type de ciment donné. Ces essais permettent d'évaluer la qualité du ciment et sa conformité aux exigences normatives.

Parmi les propriétés étudiées figurent notamment :

- La masse volumique absolue et apparente,
- La consistance normale,
- Le temps de prise,
- La résistance mécanique,
- Ainsi que d'autres caractéristiques physiques essentielles.

III.7.1. Masse volumique absolue du ciment :

La masse volumique absolue du ciment correspond à la masse d'unité de volume du matériau à l'état anhydre, c'est-à-dire sans tenir compte des vides entre les particules. Sa valeur moyenne pour les ciments usuels est généralement de l'ordre de 3240 kg/m³, soit environ 3,0 à 3,2 g/cm³, selon la composition chimique du ciment.

a). Objectif de l'essai :

L'objectif de cet essai est de déterminer la masse volumique absolue du ciment anhydre, dont la valeur varie en fonction de la composition minéralogique du ciment, tout en restant généralement comprise entre 3,0 et 3,2 g/cm³.

b). Principe de l'essai (Méthode au pycnomètre) :

Le principe de cette méthode consiste à comparer la masse d'un volume connu de ciment à celle d'un volume équivalent d'un liquide de masse volumique connue. La masse volumique du ciment est déterminée à partir de la relation suivante :

$$\rho_c = \rho_t \times \frac{m_c}{m_t}$$

Avec :

- ρ_c : masse volumique absolue du ciment (g/cm³)
- ρ_t : masse volumique du liquide utilisé (g/cm³)
- m_c : masse du ciment (g)
- m_t : masse du liquide de même volume (g)

c). Principe de la mesure (Méthode au voluménomètre de Le Chatelier) :

Cette méthode consiste à mesurer le déplacement du niveau d'un liquide contenu dans un récipient à col étroit, après introduction d'une masse connue de ciment.

Le liquide utilisé doit être inerte vis-à-vis du ciment, afin d'éviter toute réaction chimique susceptible d'altérer les résultats. Traditionnellement, le tétrachlorure de carbone était utilisé, mais pour des raisons de sécurité et de santé, il est désormais recommandé d'utiliser des liquides tels que le toluène ou d'autres liquides non réactifs.

d. Équipement nécessaire :

Le matériel requis pour la réalisation de cet essai comprend :

- Un voluménomètre (Le Chatelier) d'une contenance minimale de 50 cm³
- Un récipient contenant de l'eau maintenue à $20 \pm 1^\circ\text{C}$
- Un liquide inerte vis-à-vis du ciment (par exemple toluène)
- Une balance de précision, adaptée à la masse de l'échantillon
- Un thermomètre, précis à $0,1^\circ\text{C}$, permettant de contrôler la température ambiante

e). Conduite de l'essai (Mode opératoire) :

L'essai est réalisé selon les étapes suivantes :

1. Remplir le voluménomètre avec le liquide inerte jusqu'à ce que le niveau atteigne une graduation comprise entre 0 et 1, en évitant de mouiller les parois internes.
2. Placer le voluménomètre dans un bain d'eau maintenu à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ afin d'assurer l'équilibre thermique.
3. Peser une masse de 64 g de ciment, avec une précision de $\pm 0,1$ g.
4. Repérer précisément le niveau initial du liquide, noté N_0 .
5. Introduire lentement le ciment dans le voluménomètre (sur une durée d'environ 15 minutes) afin d'éviter la formation de bulles d'air ou le dépôt de particules sur les parois.
6. Boucher le voluménomètre, l'incliner d'environ 45° , puis effectuer un mouvement de va-et-vient afin de faciliter l'élimination des bulles d'air.
7. Replacer l'appareil dans le bain d'eau et attendre l'équilibre thermique, puis relever le niveau final, noté N_1 .

La masse volumique absolue du ciment est alors calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\rho_c = \frac{64}{N_1 - N_0}$$

Avec :

- ρ_c : masse volumique absolue du ciment (g/cm³)
- N_0 : niveau initial du liquide
- N_1 : niveau final après introduction du ciment

III.7.2. Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente du ciment correspond à la masse du matériau par unité de volume, y compris les vides inter granulaires présents entre les particules.

Pour les ciments usuels, la masse volumique apparente présente généralement une valeur moyenne de l'ordre de : $\rho_a \approx 1367,8 \text{ kg/m}^3$

Cette valeur peut varier en fonction :

- De la finesse du ciment,
- Du mode de stockage,
- Du degré de compactage du matériau.

La détermination de cette propriété est importante pour :

- L'évaluation des volumes nécessaires au stockage,
- Le dimensionnement des silos,
- Et le calcul des dosages volumétriques dans certaines applications.

III.7.3. Détermination des temps de début et de fin de prise :

La détermination des temps de début et de fin de prise constitue un essai fondamental pour l'évaluation du comportement des liants hydrauliques. Ces paramètres permettent d'estimer le temps disponible pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons, avant le début du durcissement. Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat, qui permet d'identifier deux repères essentiels : le temps de début de prise et le temps de fin de prise.

a). Objectif de l'essai :

L'objectif principal de cet essai est de déterminer les temps de début et de fin de prise d'une pâte de ciment, afin d'évaluer la durée pendant laquelle le matériau reste plastique et peut être correctement mis en place dans les ouvrages en béton ou en mortier. Ces paramètres sont indispensables pour :

- Planifier les opérations de mise en œuvre,
- Éviter les défauts liés à un durcissement prématuré,
- Contrôler la qualité et la conformité du ciment aux normes en vigueur.

b). Principe de l'essai :

Le principe de l'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de ciment de consistance normalisée, à l'aide de l'appareil de Vicat, équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre soumise à une charge standardisée de 300 g. Le temps de début de prise correspond à l'instant où, sous l'action de cette charge, l'aiguille pénètre dans la pâte et s'arrête à une distance $d = 4 \pm 1 \text{ mm}$ du fond du moule. Le temps de fin de prise correspond à l'instant où l'aiguille ne pénètre plus dans la pâte que sur une profondeur maximale de 0,5 mm. Les temps sont mesurés à partir du début du malaxage de la pâte de ciment.

c). Équipement requis :

L'essai nécessite le matériel suivant :

- Salle climatisée :
L'essai doit être réalisé dans une salle maintenue à une température de : 20 ± 1 °C avec une humidité relative supérieure à 90 %.
À défaut, l'échantillon peut être conservé dans un bain d'eau maintenu à la même température entre deux mesures.
- Malaxeur normalisé, comprenant :
 - une cuve d'une capacité de 5 litres,
 - une pale de malaxage à deux vitesses :
 - Vitesse lente : 140 tr/min
 - Vitesse rapide : 285 tr/min
- Appareil de Vicat, constitué de :
 - un moule tronconique de 40 mm de hauteur,
 - une tige coulissante équipée d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre
- Balance de précision ($\pm 0,1$ g)
- Chronomètre précis à 0,1 s

d). Conduite de l'essai (Mode opératoire) :

Le mode opératoire est défini conformément à la norme EN 196-3.

Préparation de la pâte :

Une pâte de ciment de consistance normalisée est préparée selon les conditions suivantes :

- Prélever environ 2 kg de ciment.
- Préparer une pâte pure avec un rapport eau/ciment (E/C) = 0,26, permettant la préparation de plusieurs moules.

Dans certains cas expérimentaux, un accélérateur de prise peut être utilisé afin de réduire la durée des essais. À cet effet, on peut dissoudre du chlorure de calcium (CaCl_2) dans l'eau de gâchage, à raison de : 2 % du poids de l'eau utilisée. L'eau contenant l'accélérateur est ensuite versée dans la cuve du malaxeur contenant le ciment, tout en déclenchant simultanément les chronomètres.

Séquence de malaxage :

Le malaxage est effectué selon la séquence suivante :

Opération	Introduction de l'eau	Mise en marche	Arrêt	Mise en marche
Durée	5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
État du malaxeur	Vitesse lente	Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

Mise en place de la pâte :

La pâte obtenue est introduite rapidement dans le moule tronconique, préalablement posé sur une plaque de verre, sans appliquer de tassement ni de vibration excessive.

L'excès de pâte est éliminé à l'aide d'une truelle, par un mouvement de va-et-vient, maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule.

L'ensemble est ensuite placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

Détermination du temps de début de prise :

Quatre minutes après le début du malaxage :

1. Amener l'aiguille à la surface de la pâte.
2. Relâcher l'aiguille sans vitesse initiale.
3. Observer la pénétration de l'aiguille dans la pâte.
4. Lorsque l'aiguille s'immobilise (ou après 30 secondes), mesurer la distance d séparant son extrémité de la plaque de base.

L'opération est répétée à des intervalles réguliers d'environ 10 à 15 minutes, jusqu'à ce que :

$$d = 4 \pm 1 \text{ mm}$$

L'instant correspondant, mesuré à ± 5 minutes près, représente-le :

★ Temps de début de prise du ciment étudié

Détermination du temps de fin de prise :

La détermination du temps de fin de prise se poursuit en répétant les mesures jusqu'à ce que l'aiguille ne pénètre plus dans la pâte que sur une profondeur maximale de : 0,5 mm L'instant correspondant représente le :

★ Temps de fin de prise

Début de prise	Ciment à prise
< 8 minutes	Rapide
8 à 30 minutes	Demi-lente
30 minutes à 6 heures	Lente
> 6 heures	Très lente

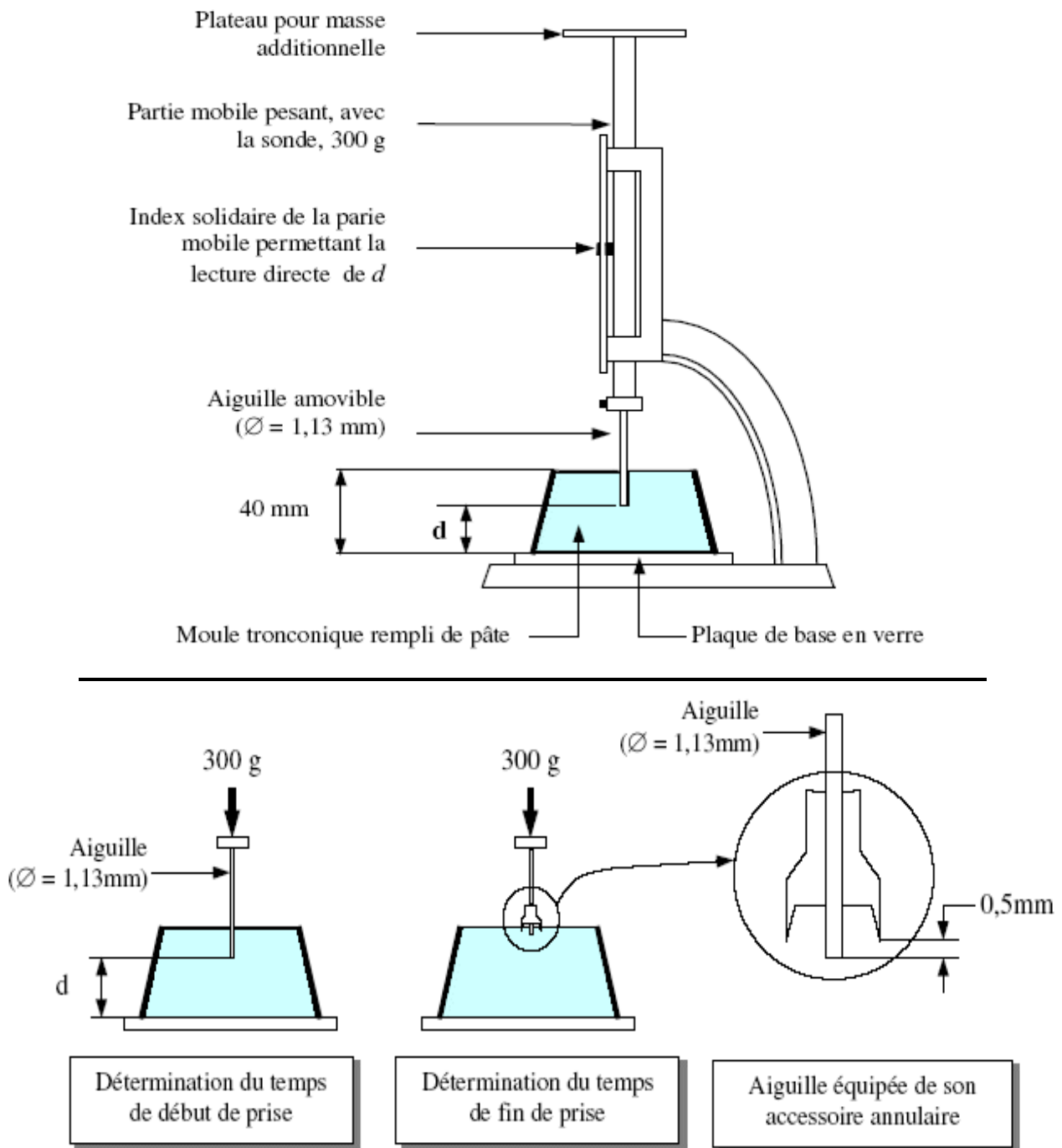


Figure III-3 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible

III.7.4. Détermination de la consistance normalisée de la pâte de ciment :**a). Objectif de l'essai :**

La consistance d'une pâte de ciment est une propriété rhéologique fondamentale qui caractérise son degré de fluidité ou de viscosité. L'évaluation de cette propriété s'appuie généralement sur deux méthodes normatives :

1. L'essai de consistance à l'appareil de Vicat, régi par la norme
2. L'essai d'écoulement au cône, conformément à la norme

Étant donné que la consistance de la pâte de ciment évolue de manière continue en fonction du temps et de divers facteurs physico-chimiques, il est indispensable de fixer un état initial de référence afin de garantir la reproductibilité des essais comparatifs. L'objectif de cet essai est donc de déterminer le dosage en eau optimal permettant d'obtenir une consistance standardisée, qualifiée de « **CONSISTANCE NORMALISÉE** ».

b). Principe de l'essai :

Le principe repose sur la mesure de la profondeur d'enfoncement d'une sonde cylindrique standardisée dans la pâte, agissant sous l'effet d'une charge constante. La profondeur de pénétration est proportionnelle à la fluidité du mélange. La consistance ainsi mesurée est définie comme la « **Consistance Vicat** ».

c). Équipement requis :

- **Un malaxeur de laboratoire normalisé :** Équipé d'une cuve d'une capacité de 5 litres et d'une pale de malaxage à deux vitesses de rotation :
 - Vitesse lente : 140 ± 5 tr/min
 - Vitesse rapide : 285 ± 10 tr/min
- **Un appareil de Vicat :** Composé d'un moule tronconique (hauteur : 40 mm) et d'une tige coulissante munie à son extrémité d'une sonde cylindrique de 10 mm de diamètre. La masse totale de la partie mobile (tige + sonde) est de 700 ± 1 g.
- **Une balance de précision :** Permettant d'effectuer des pesées à ± 1 g près.
- **Un chronomètre :** Assurant une précision de ± 1 s.

d). Procédure expérimentale (Conduite de l'essai) :

Malaxage de la pâte :

Une prise d'essai de 500g de ciment est pesée et introduite dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau introduite initialement (estimée par approximations successives) est versée de manière continue sur une durée comprise entre 5 et 10 secondes. Le chronomètre est déclenché immédiatement dès le début de l'introduction de l'eau. Le processus de malaxage suit rigoureusement la chronologie suivante :

Remplissage et mesure :

- Dès la fin du malaxage, la pâte est rapidement introduite dans le moule tronconique, préalablement disposé sur une plaque de verre, en évitant tout compactage ou vibration excessive.
- L'excès de pâte est arasé par un mouvement de va-et-vient au moyen d'une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. L'ensemble est ensuite positionné sur la platine de l'appareil de Vicat.

- À l'échéance exacte de **quatre minutes (4 min)** après le début du malaxage, la sonde est abaissée délicatement jusqu'au contact de la surface supérieure de l'échantillon, puis relâchée sans élan pour s'enfoncer librement sous son propre poids.
- Après stabilisation de la sonde (ou après un délai d'attente de 30 s), on mesure la distance minimale d séparant l'extrémité inférieure de la sonde et la plaque de verre de base.

e). Interprétation et expression des résultats :

La distance résiduelle d mesurée caractérise directement l'état de consistance de la pâte étudiée :

- **Consistance normalisée atteinte** : Si la distance lue est de $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (soit un intervalle compris entre 5 et 7 mm), la pâte est déclarée à « consistance normalisée ». La valeur correspondante du rapport Eau/Ciment (E/C) est alors définitivement retenue pour la suite des essais (comme la prise).
- **Consistance non conforme** : Si la distance mesurée sort de cet intervalle ($d < 5 \text{ mm}$ ou $d > 7 \text{ mm}$), l'essai est invalidé. Il convient alors de réitérer l'ensemble de la procédure avec une nouvelle gâchée de ciment, en ajustant la quantité d'eau (le rapport E/C) par itérations jusqu'à l'obtention de la valeur cible de d .

III.7.5. Détermination de la stabilité du ciment (Essai Le Chatelier) :

a). Objectif de l'essai :

L'essai de stabilité a pour objectif de mettre en évidence et d'évaluer l'expansion volumique tardive que pourrait subir une pâte de ciment au cours de son hydratation. Ce phénomène d'expansion est généralement induit par la présence de teneurs excessives en chaux libre (CaO) ou en magnésie (MgO), dont l'hydratation tardive s'accompagne d'une augmentation de volume susceptible de provoquer des microfissurations au sein de la matrice cimentaire.

b). Principe de l'essai :

Le principe repose sur l'accélération des réactions chimiques d'hydratation de la chaux et de la magnésie par le biais d'un traitement thermique (immersion dans l'eau bouillante). Cela permet de provoquer et de quantifier l'expansion potentielle du liant dans un délai court, simulant ainsi son comportement à long terme.

c). Équipement requis :

- **Un malaxeur de laboratoire normalisé** : Conforme à la norme NF EN 196-3.
- **Deux moules Le Chatelier** : Constitués d'un cylindre en laiton élastique fendu longitudinalement, équipés de deux aiguilles indicatrices soudées de part et d'autre de la fente pour amplifier visuellement l'écartement.

- **Un bain d'eau avec système de chauffage** : Capable d'immerger totalement les éprouvettes et de porter la température de l'eau de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ à l'ébullition en 30 ± 5 min.
- **Une enceinte thermohygrométrique (armoire humide)** : Maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative minimale de 90%.
- **Des plaques de verre et des surcharges (masses)** : Pour fermer le moule et maintenir le confinement de la pâte durant la phase initiale.

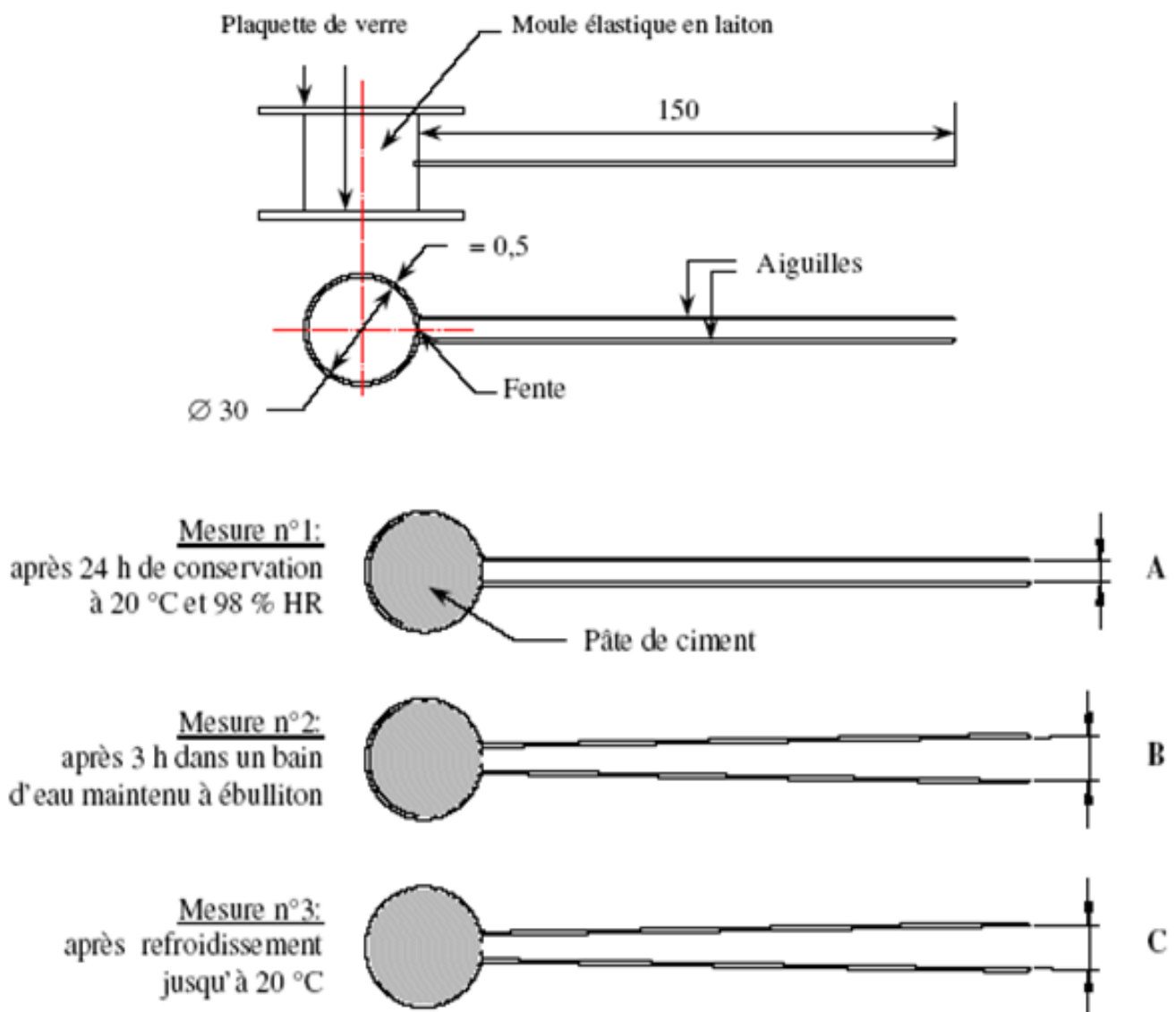


Figure III-4 : Essai de stabilité avec l'appareil le chantelier

d). Procédure expérimentale (Conduite de l'essai)

L'essai est conduit conformément aux exigences opérationnelles de la norme NF EN 196-3 :

1. **Préparation et moulage** : Une pâte de ciment à **consistance normalisée** (déterminée préalablement à l'aide de l'appareil de Vicat) est préparée. Deux moules Le Chatelier, préalablement huilés, sont remplis rapidement sans compactage excessif. Le moule est maintenu entre deux plaques de verre recouvertes d'un léger film d'huile, surmontées d'une petite masse de lestage.
2. **Conservation initiale (24 heures)** : L'ensemble (moules, verres et surcharges) est immédiatement placé dans l'armoire humide à 20°C pendant 24h±30min afin de permettre la prise du ciment.
3. **Première mesure (A)** : À l'issue des 24 heures, les moules sont sortis de l'enceinte. On mesure à 0,5mm près la distance A séparant l'extrémité des aiguilles indicatrices.
4. **Traitement thermique et seconde mesure (B)** : Les moules sont ensuite immergés dans le bain d'eau à 20°C. Le chauffage est activé pour atteindre l'ébullition en 30±5min. L'ébullition est maintenue de manière continue pendant une durée de 3h±5min. À la fin de cette période, on mesure l'écartement B entre les pointes des aiguilles (mesure à chaud).
5. **Refroidissement et mesure finale (C)** : Le chauffage est interrompu et les moules sont laissés à refroidir jusqu'à revenir à la température ambiante de 20°C ± 2°C. On procède alors à la mesure de l'écartement final C entre les pointes.

e). Expression et interprétation des résultats

L'expansion (ou la stabilité) du ciment est caractérisée par la déformation résiduelle, exprimée en millimètres (mm) à 0,5mm près.

Selon l'évolution historique et les versions de la norme NF EN 196-3, le calcul se base sur la différence entre l'état après ébullition et l'état initial :

Expansion = C–A

Note : “ Dans certaines variantes de calcul, l'écartement à chaud B–A est également analysé, mais la valeur finale retenue pour la conformité après refroidissement reste C–A ”.

Critère de conformité réglementaire : > Pour la grande majorité des ciments courants (CEM I, CEM II, etc.), la norme fixe le seuil maximal d'expansion admissible à **10mm**.

- Si $(C-A) \leq 10\text{mm}$: Le ciment est déclaré **stable**.
- Si $(C-A) > 10\text{mm}$: Le ciment présente un risque d'expansion pathologique et est déclaré **non conforme**.

III.8. Formulation granulaire du béton

La formulation granulaire constitue une étape essentielle dans la conception des bétons. Elle vise à déterminer les proportions optimales des différentes classes granulaires afin d'obtenir un mélange présentant une bonne compacité, une ouvrabilité satisfaisante et des performances mécaniques élevées. Plusieurs méthodes ont été développées à cet effet, parmi lesquelles la méthode de Faury, largement utilisée dans la formulation des bétons ordinaires.

III.8.1. Généralités sur la composition granulaire

La composition granulaire correspond à la répartition des particules selon leur dimension au sein d'un mélange de granulats. Une distribution granulométrique bien étagée permet de réduire les vides entre les grains, d'améliorer la compacité du béton et de diminuer la quantité de pâte de ciment nécessaire. La qualité de cette composition influence directement les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

III.8.2. Méthode de Faury

La méthode de Faury est une méthode de formulation basée sur la recherche d'une compacité maximale du squelette granulaire. Elle repose sur une courbe granulométrique de référence permettant de déterminer les proportions optimales des différentes fractions granulaires. Cette méthode vise à obtenir un mélange présentant un minimum de vides et une bonne maniabilité tout en assurant des résistances mécaniques satisfaisantes.

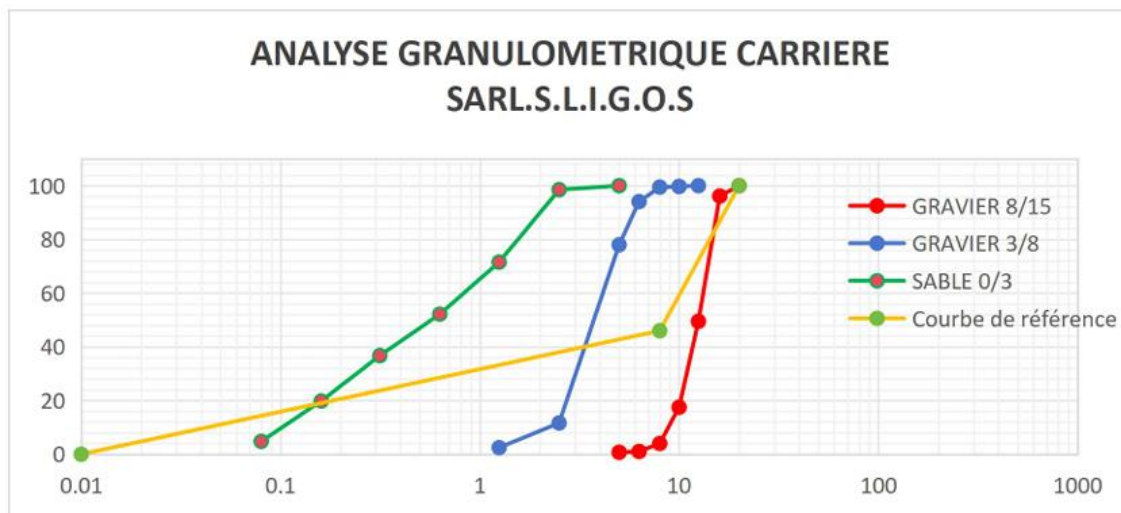
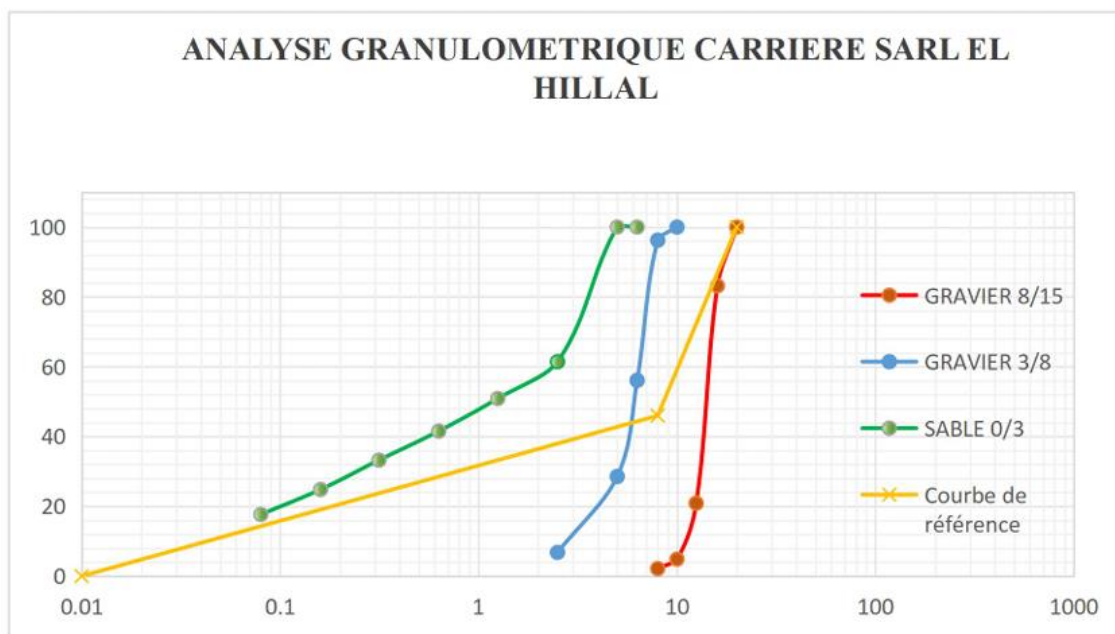
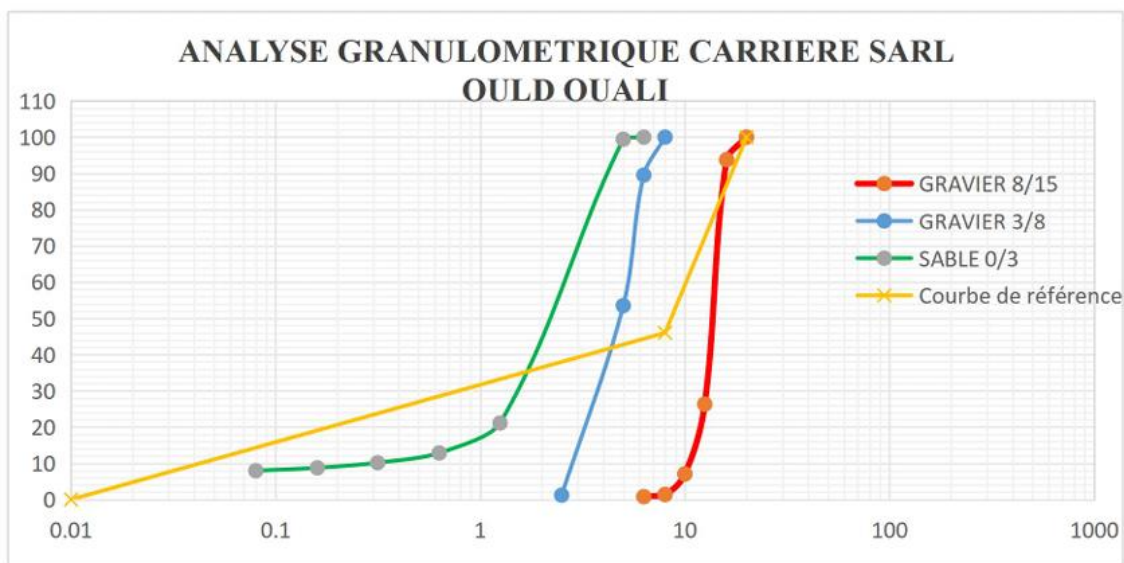
III.8.3. Courbes granulométriques de référence de Faury

Les courbes de référence de Faury représentent la distribution granulométrique idéale que doit approcher le mélange des granulats. Elles servent de guide pour apprécier la qualité de l'étalement granulométrique et vérifier la continuité des différentes fractions utilisées. Plus la courbe expérimentale se rapproche de la courbe de référence, meilleure est généralement la compacité du mélange.

III.8.4. Courbes granulométriques des matériaux utilisés

Les analyses granulométriques ont été réalisées sur les différentes fractions granulaires utilisées dans cette étude, à savoir le sable 0/3, le gravier 3/8 et le gravier 8/15 provenant des carrières sélectionnées. Les courbes obtenues permettent d'évaluer la répartition des particules et de vérifier leur conformité vis-à-vis des exigences de la méthode de Faury.

Les courbes de références sont présentées ci-dessous :



III.8.5. Analyse et interprétation des résultats**1. Carrière SARL Ould Ouali :**

L'analyse granulométrique montre que les courbes du sable 0/3, du gravier 3/8 et du gravier 8/15 présentent une répartition relativement continue des granulats. La combinaison des différentes fractions permet d'obtenir une courbe globale proche de la courbe de référence de Faury, notamment dans la zone des gros granulats. Cette conformité indique une bonne compacité potentielle du squelette granulaire et une formulation favorable à l'obtention d'un béton de bonne qualité.

2. Carrière SARL S.L.I.G.O.S :

Les courbes granulométriques des différents granulats présentent un écart plus marqué par rapport à la courbe de référence, particulièrement au niveau de la fraction sableuse. Toutefois, la répartition des classes granulaires reste progressive et assure une continuité acceptable du mélange. Cette granulométrie peut nécessiter un ajustement des proportions des constituants afin d'améliorer la compacité et de réduire les vides dans le béton.

3. Carrière SARL El Hillal :

Les résultats montrent une bonne distribution des différentes classes granulaires avec une courbe globale relativement proche de la courbe de référence de Faury. La progression régulière des pourcentages passants traduit une granulométrie bien étagée favorisant un bon empilement des grains. Cette configuration est généralement recherchée pour améliorer la maniabilité du béton tout en limitant la quantité de pâte nécessaire.

Par comparaison avec la courbe de référence de Faury, les granulats provenant des carrières **Ould Ouali** et **El Hillal** présentent la meilleure concordance granulométrique, traduisant une bonne compacité potentielle du mélange. La carrière **S.L.I.G.O.S** montre un écart légèrement plus important, notamment dans la fraction fine, mais demeure compatible avec une utilisation en béton moyennant un ajustement approprié de la formulation.

III.9. Conclusion :

Au terme de ce chapitre, il apparaît que le béton est un matériau composite dont les performances dépendent étroitement de la qualité de ses constituants et de leur formulation. Parmi ces constituants, le ciment occupe une place prépondérante en tant que liant hydraulique, assurant la cohésion du mélange et influençant directement les propriétés mécaniques, rhéologiques et la durabilité du béton. Ses caractéristiques varient en fonction de sa composition chimique et minéralogique, ce qui rend le choix du type de ciment particulièrement important pour satisfaire les exigences de l'ouvrage à réaliser.

Dans le cadre de cette étude, le ciment Portland composé CEM II a été retenu en raison de ses performances adaptées aux bétons courants, de sa large utilisation dans la région de Saïda et de sa disponibilité locale à travers la cimenterie d'El Hassasna. Les différents essais réalisés ont permis de caractériser ses propriétés physiques et mécaniques et de vérifier sa conformité aux exigences normatives.

Par ailleurs, l'étude de la composition granulaire des granulats, fondée sur la méthode de Faury, a mis en évidence l'importance d'une répartition granulométrique équilibrée pour assurer une bonne compacité du squelette granulaire. La comparaison des courbes expérimentales avec les courbes de référence a montré que les matériaux étudiés présentent globalement une granulométrie compatible avec la formulation de bétons de qualité.

CHAPITRE IV

COMPOSITION DE BETON PAR LA METHODE DE FAURY ET CONFECTION DES EPROUVETTES

IV. Introduction :

D'une manière générale, il n'existe pas de formulation universelle ou de méthode de composition du béton qui soit reconnue comme optimale de façon absolue. En effet, la formulation d'un béton d'ingénierie s'apparente systématiquement à la recherche d'un compromis technico-économique entre plusieurs exigences scientifiques et structurelles, souvent antagonistes. Bien que de nombreuses approches théoriques, plus ou moins complexes, aient été développées au fil des ans, il demeure impératif de valider toute étude de formulation par une phase expérimentale en laboratoire. Par la suite, les résultats obtenus à l'échelle du laboratoire doivent impérativement faire l'objet d'un ajustement (une correction de chantier) afin de s'adapter aux conditions réelles de production et de mise en œuvre in situ.

IV-1. Critères d'optimisation d'un béton :

Une méthode de formulation est jugée satisfaisante lorsqu'elle permet l'obtention d'un matériau composite répondant simultanément aux performances contractuelles suivantes :

- **Performances mécaniques :** Atteindre la résistance à la compression cible (f_{c28}) après durcissement (généralement à 28 jours).
- **Ouvrabilité et maniabilité :** Garantir que le béton à l'état frais présente une consistance appropriée pour une mise en œuvre, un pompage et un serrage (vibration) optimaux, en parfaite adéquation avec les moyens du chantier.
- **Durabilité et stabilité dimensionnelle :** Minimiser les déformations différées, notamment le retrait hydraulique et le fluage.
- **Optimisation économique :** Réduire le coût de revient du mètre cube de béton tout en respectant les exigences qualitatives.

Évolution Historique et Approches Scientifiques :

Historiquement, la formulation du béton reposait sur des prescriptions empiriques basées sur des proportions fixes et théoriques de liant (ciment) et de squelette granulaire (sable et gravillons). Néanmoins, face aux progrès considérables de la cimenterie moderne et de la science des matériaux, les recherches se sont orientées vers l'établissement de lois mathématiques et de modèles granulométriques basés sur des critères de performance ciblés :

- **L'optimisation de la compacité :** La réduction maximale de l'indice des vides internes, facteur clé pour l'élévation des résistances mécaniques.
- **L'imperméabilité :** L'amélioration de l'étanchéité de la matrice cimentaire pour accroître la durabilité face aux agents agressifs.

- **La durabilité chimique et environnementale** : La résistance aux attaques sulfatiques, aux cycles de gel-dégel, à l'abrasion mécanique et aux phénomènes de dessiccation. Contrairement aux pratiques artisanales des chantiers de petite envergure — qui appliquent encore des ratios volumétriques traditionnels (par exemple : $\approx 800\text{L}$ de gravillonnages, 400L de sable pour 350 à 400 kg/m^3 de ciment) avec une maîtrise aléatoire de l'eau de gâchage — l'ingénierie des bétons modernes exige une approche rigoureuse. La variation du rapport Eau/Ciment (E/C), l'humidité intrinsèque des granulats et la cinétique d'hydratation sont des paramètres scientifiques stricts qui ne peuvent être laissés au seul jugement empirique.

Flexibilité du Matériau et Méthodologies Adoptées :

Aujourd'hui, le béton est un matériau hautement adaptable. En modulant la nature physico-chimique des granulats, l'introduction d'adjuvants de performance (superplastifiants, entraîneurs d'air, etc.), l'ajout d'additions minérales ou l'application de traitements de surface, il est possible de concevoir un matériau "sur mesure", répondant aux exigences architecturales et structurelles les plus complexes.

En somme, la formulation d'un béton et le dosage de ses constituants dépendent intrinsèquement de la destination de l'ouvrage, de la densité du ferrailage et des modes de mise en œuvre prévus.

Parmi les approches méthodologiques les plus reconnues en science des matériaux, deux grandes doctrines se distinguent :

- **La méthode de M. VALETTE** : Basée sur le principe d'une **granulométrie discontinue**, adoptant une démarche essentiellement expérimentale.
- **La méthode de M. FAURY** : Basée sur une approche de **granulométrie continue**, visant à optimiser la compacité théorique du mélange.

C'est cette dernière approche (la méthode FAURY) qui fera l'objet de notre étude et de notre application dans le cadre de ce travail de recherche. [5,6]

IV.2. Principe de la Méthode de FAURY :

Le principe fondamental de la méthode de formulation de **FAURY** repose sur la détermination d'une **courbe granulométrique de référence (ou courbe théorique)**. Cette courbe cible est conçue pour optimiser la compacité du mélange en réduisant au maximum l'indice des vides. L'objectif de la méthode est d'ajuster les proportions des différents constituants afin que la courbe granulométrique réelle du mélange global (Ciment + Sable + Gravillons) s'approche au plus près de cette courbe théorique idéale.

Pour mener à bien cette optimisation géométrique et granulaire, la connaissance préalable des paramètres physiques suivants est rigoureusement requise :

1. **Les caractéristiques granulométriques individuelles** : Il est indispensable d'établir, par analyse tamisométrique, les courbes granulométriques de chacun des composants solides du squelette (sable et différentes classes de gravillons).
2. **Le volume absolu global des solides (Vs)** : Il est nécessaire de déterminer le volume absolu total des matériaux solides (exprimé en L/m^3 ou m^3) devant entrer dans la composition d'un mètre cube de béton frais après serrage, en prenant en considération le dosage en ciment préétabli.

IV.3. Méthode de Calcul et Formalisme Mathématique :

a). Détermination du Diamètre Maximal des Granulats (D_{max}) :

Le choix du diamètre maximal (**D_{max}**) est un paramètre critique qui conditionne l'ouvrabilité du béton et le risque de ségrégation. Dans certains cas expérimentaux, une incertitude peut subsister quant à la valeur exacte de la dimension maximale des granulats, notamment lorsque les éléments de fraction supérieure sont hautement minoritaires ou marginaux dans la courbe granulométrique réelle.

Pour pallier cette ambiguïté et obtenir une valeur rigoureuse de D, la méthode de FAURY introduit une interpolation linéaire basée sur la formule suivante :

$$D = d_1 + (d_2 - d_1) \times \frac{X}{Y}$$

Avec :

- **D** : Le diamètre maximal théorique recherché du granulat (en mm).
- **d₁** : L'ouverture de la maille du tamis immédiatement inférieure à D (en mm).
- **d₂** : L'ouverture de la maille du tamis immédiatement supérieure à d₁ (en mm).
- **X** : Le pourcentage massique des grains cumulés retenus sur le tamis d₁ (le refus cumulé sur d₁).
- **Y** : Le pourcentage des grains de la fraction granulaire comprise entre les tamis d₁ et d₂ (le tamisat intermédiaire).

b). Indice des Vides et Rayon Moyen du Moule (R) :

L'indice des vides, noté I, représente le volume total des vides interstitiels contenus dans un mètre cube (1m³) du mélange sec optimisé (Ciment + Sable + Gravillons), considéré à sa compacité maximale après serrage.

Selon le modèle mathématique de **FAURY**, la valeur minimale théorique de cet indice est régie par l'équation semi-empirique suivante :

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

Où :

- **D** : Le diamètre maximal des granulats (en {mm}), déterminé précédemment.
- **K** : Un coefficient de compacité adimensionnel, dépendant de la consistance visée pour le béton frais, de l'énergie de serrage (vibration) et de la nature géologique/angularité des granulats (roulés ou concassés).
- **K'** : Un coefficient correcteur traduisant la consistance globale. Sa valeur varie de 0,004 (pour un béton fluide/mou) à 0,002 (pour un béton ferme). Pour un béton courant, il est d'usage de fixer K' = 0,003.
- **R** : Le rayon moyen du moule (analogue au rayon hydraulique en mécanique des fluides), exprimé en mm

L'effet de Paroi et Calcul de R :

L'introduction du paramètre R dans la formule de Faury permet d'intégrer analytiquement « **l'effet de paroi** ». Ce phénomène physique traduit l'augmentation locale de l'indice des vides au voisinage direct des parois, due à l'impossibilité pour les gros granulats de se réarranger de manière compacte contre une surface plane.

L'indice des vides croît proportionnellement avec l'augmentation de la surface spécifique des parois en contact avec le béton frais (coffrages, armatures longitudinales et transversales, surface libre).

Le rayon moyen R est défini géométriquement par le rapport suivant :

$$R = \frac{V_{\text{béton}}}{S_{\text{paroi}}}$$

Avec :

- **V_{béton}** : Le volume total de béton à couler dans l'élément structurel.
- **S_{paroi}** : La surface totale développée des parois du coffrage augmentée de la surface développée de toutes les armatures en contact avec le béton.

Remarque importante de conception : Le calcul de R doit être effectué au niveau de la section géométrique où l'effet de paroi est théoriquement le plus restrictif (densité de ferrailage maximale). De plus, il est impératif de vérifier la condition aux limites suivante : $R \geq D$.

c) Valeurs Usuelles du Coefficient de Compacité K :

Le tableau ci-dessous rassemble les valeurs expérimentales du coefficient K en fonction des conditions de mise en œuvre et de la morphologie des granulats :

Tableau IV-1 : Valeurs usuelles du coefficient de compacité K (Modèle de FAURY).

Consistance du béton	Moyen de mise en œuvre	Nature des granulats (Sable roulé + Gravier roulé)	Nature des granulats (Sable roulé + Gravier concassé)	Nature des granulats (Sable concassé + Gravier concassé)
Molle	Piquage / Damage manuel	0,34	0,36	0,38
Normal	Vibration moyenne	0,26 à 0,28	0,28 à 0,30	0,30 à 0,34
Ferme	Vibration poussée	0,25 à 0,27	0,26 à 0,28	0,28 à 0,30
Très ferme	Vibration puissante	$\leq 0,24$	$\leq 0,25$	

d). Dosage en eau et en ciment :

1. Détermination du dosage en eau d'apport (E) :

La quantité optimale d'eau de gâchage (E) nécessaire à la confection d'un mètre cube (1 m^3) de béton est évaluée sur la base de l'**indice des vides (I)** du squelette granulaire. Afin de garantir la maniabilité requise, cet indice subit une majoration empirique dépendante de la consistance visée :

- **Pour un béton de consistance ferme :** L'indice des vides est majoré de 20%, d'où la relation : $E = 1,2 \times I$
- **Pour un béton de consistance molle :** L'indice des vides est majoré de 30%, d'où la relation : $E = 1,3 \times I$

2. Corrections et ajustements expérimentaux :

La quantité d'eau déterminée théoriquement doit impérativement faire l'objet de corrections sur site ou lors des gâchées d'essai, en considérant deux facteurs majeurs :

- **Ajustement de l'ouvrabilité (Maniabilité) :** Si la plasticité réelle du béton frais diverge des exigences du cahier des charges, une correction de la quantité d'eau s'impose. Cette propriété est contrôlée expérimentalement par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump-test).
- **Correction de l'état hydrique des granulats :** En pratique, les granulats mis en œuvre sur chantier présentent une humidité superficielle non négligeable. La quantité d'eau de gâchage finale doit donc être diminuée de la masse d'eau libre déjà apportée par le stock granulaire.

Note théorique : Une masse brute M de granulats humides est définie par la relation :

$$M = M' + m_w$$

Où M' représente la masse du matériau sec et m_w la masse de l'eau interstitielle.

3. Détermination du dosage en ciment (C) :

Le dosage en ciment, exprimé en masse par mètre cube de béton (kg/m^3), est une variable fondamentale généralement imposée par le cahier des charges (CCTP) ou déterminée en fonction de la classe de résistance mécanique (à la compression à 28 jours, f_{c28}) et des critères de durabilité (liés à la classe d'exposition de l'ouvrage).

Une fois la masse de ciment (C) fixée, son volume absolu (V_c) introduit dans le mélange est rigoureusement calculé en considérant la densité absolue (masse volumique absolue) des grains de ciment, généralement établie à $\rho_c = 3,1 \text{ g/cm}^3$ (soit 3100 kg/m^3).

La relation permettant d'intégrer ce paramètre dans l'équation de compacité absolue du béton est définie par :

$$V_c = \frac{C}{\rho_c} = \frac{C}{3,1}$$

- V_c : est le volume absolu du ciment (en L/m^3).
- C : est la masse du ciment (en kg/m^3).
- $3,1$: correspond à la densité relative du ciment (sans unité).

e). Détermination des pourcentages de sable et de gravier

1. Tracé de la courbe granulométrique de référence (Méthode de FAURY) :

La courbe granulométrique idéale du mélange sec (Ciment + Sable + Gravier) menant à une compacité maximale est théoriquement modélisée par une courbe de référence. Selon l'approche de FAURY, une distinction rigoureuse est faite entre les éléments fins (diamètre $< D/2$) et les gros éléments (diamètre $> D/2$). De ce fait, la courbe de référence est simplifiée par un tracé bilinéaire composé de deux segments de droite, **AB** et **BC**, définis par les points caractéristiques suivants :

- **Point A (Origine des fins) :** Ordonnée : $Y_A = 0 \%$
 - Abscisse : $d_c = 0,0065 \text{ mm}$ (représentant le diamètre théorique des grains de ciment les plus fins).
- **Point C (Terminus du squelette) :** Ordonnée : $Y_C = 100\%$
 - Abscisse : D (Dimension maximale des granulats, $D_{\max}$).
- **Point B (Point de brisure à $D/2$) :** Abscisse : $X_B = D/2$
 - Ordonnée : Y_B (calculée analytiquement en fonction de la consistance, de la mise en œuvre et de l'effet de paroi).

L'ordonnée du point de brisure B ($Y_{D/2}$) est déterminée par la formule générale de Faury :

$$Y_{D/2} = A + B \times \left(\frac{D}{2}\right)^{1/5} + \frac{K}{R}$$

Où :

- **D** : Dimension maximale des granulats (mm).
- **B** : Coefficient correcteur lié à la consistance du béton ($B = 2$ pour un béton mou ; $B = 1$ pour un béton très ferme).
- **R** : Rayon moyen du moule ou rayon hydraulique du coffrage (induit l'effet de paroi).
- **A** : Paramètre empirique dépendant de la consistance du béton, de l'énergie de mise en œuvre et de la forme géométrique des granulats (Tableau IV-2).

Tableau IV-2 : Valeurs du coefficient A de Faury

Consistance du béton	Moyen de mise en œuvre	Sable roulé / Gravier roulé	Sable roulé / Gravier concassé	Sable concassé / Gravier concassé
Molle	Piquage / Damage	28	30	32
Normale	Vibration moyenne	21 à 22	23 à 24	25 à 26
Très ferme	Vibration puissante	18	19	20

2. Application pratique : Exemple d'application (Carrière SARL EL HILAL) :

Afin d'illustrer la démarche de calcul de la méthode de Faury, nous présentons ci-après l'application numérique issue des essais réalisés sur les granulats de la **carrière SARL EL HILAL**

A. Détermination du diamètre maximal réel (D_{MAX}) :

L'ajustement géométrique par interpolation donne :

$$D_{MAX} = d_1 + (d_1 - d_2) \times \frac{x}{y}$$

En introduisant les valeurs expérimentales ($d_1 = 16$ mm, $d_2 = 12,5$ mm, $x = 0,31$, $y = 6,08$) :

$$D_{max} = 16 + (16 - 12,5) \times \frac{0,31}{6,08} \Rightarrow D_{max} = 16,17 \text{ mm}$$

B. Coordonnées du point de brisure B :

• **Abscisse (X_B) :** $X_B = \frac{D_{max}}{2} = \frac{16,17}{2} = 8,08 \text{ mm}$

- **Ordonnée (Y_B) :** En appliquant la formulation simplifiée retenue pour l'étude,

Où $Y = A + 17 \times \sqrt[5]{A}$ $Y_B = 63,66\%$

C. Bilan volumétrique du mélange (1m³) :

- **Dosage en eau (E) :** Calculé d'après la compacité et l'indice de serrage K :

$$E = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} \times 1000 = 216 \text{ L/m}^3$$

- **Volume absolu du ciment (V_c) :** Pour un dosage réglementaire standard de 350 kg/m³ et une densité de 3,1 : $V_c = \frac{350}{3,1} = 113 \text{ L/m}^3$

- **Volume absolu des granulats secs (V_{agrégats}) :** Déduit par soustraction algébrique du volume de la pâte :

$$V_{\text{agrégats}} = 1000 - E = 1000 - 216 = 784 \text{ L/m}^3$$

(Note : Pour une rigueur absolue, le volume des granulats est plutôt $V_{\text{agrégats}} = 1000 - (E + V_c)$ si l'on cherche le volume granulaire net sans liant).

IV.4. Détermination des pourcentages volumétriques des constituants :

La détermination de la fraction volumétrique de chaque constituant s'effectue par la superposition, sur un même graphique, de la courbe granulaire de référence et des courbes granulométriques des différents matériaux. Pour ce calcul, la finesse du ciment est prise en compte en supposant un passant de 100% au tamis de 0,08mm.

Ainsi, l'optimisation du mélange ternaire (ciment + sable + gravier) repose sur une condition de convergence : pour une ouverture de tamis donnée, le pourcentage du passant cumulé du mélange global doit coïncider avec la valeur cible définie par la courbe de référence.

Tableau IV-3 : Revenant à notre exemple de la carrière SARL EL HILAL :

Composant	%	Vol. absolu en (L)	Poids absolu en kg	Vols apparents en (L)	Poids corrigés	Vol apparents corrigés
Ciment	13,61	112.9	350	-	350.00	-
8/15	39	323.58	873.66	642.40	868.86	638.78
3/8	17	141.05	378.01	255.41	375.91	254.00
0/3	30.39	252.16	665.70	396.25	660.29	393.03
Eau	-	170.31	170.31	-	170.31	-

IV.5. Confection et conservation des éprouvettes :

IV.5.1. Caractéristiques géométriques des moules :

La caractérisation mécanique du béton durci s'effectue généralement sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques. Conformément aux exigences normatives, le choix des dimensions de l'éprouvette est conditionné par la taille maximale des granulats (D_{max}) afin d'éviter les effets de paroi et de garantir l'homogénéité du matériau testé.

Bien que différents formats existent, les moules cylindriques (notamment de dimensions $16\text{cm} \times 32\text{cm}$ ou $11\text{cm} \times 22\text{cm}$) demeurent les plus couramment adoptés dans la pratique de laboratoire.[7]

IV.5.2. Serrage et cure du béton :

La mise en œuvre du béton frais dans les moules s'effectue par serrage (vibration mécanique ou piquage manuel), le choix du mode de compactage étant dicté par la consistance du mélange préalablement mesurée à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF EN 12350-2).

Le protocole de conservation des éprouvettes se déroule en deux phases distinctes :

- **Phase initiale (avant démoulage) :** Afin de prévenir la dessiccation précoce par évaporation, les moules sont recouverts d'un film imperméable et entreposés dans un environnement stable à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant une durée de $24\text{h} \pm 1\text{h}$.
- **Phase de cure (après démoulage) :** Après extraction, les éprouvettes sont immédiatement immergées dans un bac d'eau saturée en chaux ou placées dans une chambre humide ($HR \geq 95\%$) à une température maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à l'échéance des essais mécaniques.[8,9]

IV.6. Évaluation de l'ouvrabilité du béton frais :

L'ouvrabilité est une propriété rhéologique fondamentale du béton frais qui conditionne sa facilité de mise en œuvre, son aptitude au compactage et sa résistance à la ségrégation. Bien qu'il existe une grande diversité d'approches expérimentales pour caractériser la consistance des mélanges, la pratique de laboratoire et le contrôle de chantier privilégient les méthodes normalisées les plus représentatives et reproductibles. Dans le cadre de cette étude, l'accent est mis sur les essais les plus couramment adoptés dans le domaine du Génie Civil, qui permettent de classer le béton selon sa classe de consistance.

IV.6.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

L'essai d'affaissement (ou *Slump Test*) est la méthode la plus répandue pour caractériser la consistance et la maniabilité du béton frais, tant en laboratoire que sur chantier, en raison de sa simplicité opérationnelle et de la compacité de son appareillage.

Conformément à la norme **NF EN 12350-2**, le dispositif expérimental (illustré par la **Figure**) est constitué des quatre éléments principaux suivants :

- **Le moule tronconique (Cône d'Abrams) :** Un moule en acier galvanisé ou en matériau rigide, sans fond, présentant les dimensions nominales suivantes :
 - Hauteur : 30cm
 - Diamètre de la base inférieure : 20c.
 - Diamètre de la base supérieure : 10cm
- **La plaque d'embase :** Une surface plane, rigide et non absorbante sur laquelle repose le cône lors du remplissage, équipée de fixations ou de pattes d'appui pour stabiliser le moule.
- **La tige de piquage :** Une barre métallique rectiligne de section circulaire (généralement Ø16mm et de 60cm de longueur) à extrémités arrondies, configurée pour assurer un serrage homogène du béton par couches.
- **Le portique ou la règle de mesure :** Un dispositif de mesure permettant de quantifier avec précision (à 5mm près) l'affaissement vertical du béton après le démoulage par rapport à la hauteur initiale du cône.[10]

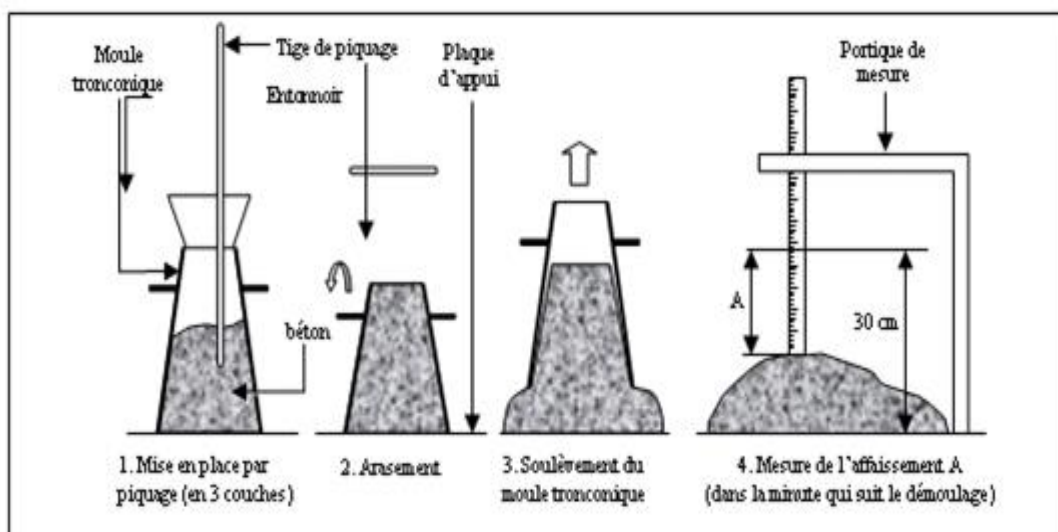


Figure IV-1 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams

1. Rappel des Classes de Consistance :

L'essai au cône d'Abrams mesure l'affaissement (slump) du béton frais pour déterminer sa maniabilité. Les classes sont réparties comme suit : [10]

Tableau IV-4 des Classes de Consistance

Affaissement (cm)	Classe de consistance
0 à 4	Ferme
5 à 9	Plastique
10 à 15	Très plastique
≥ 16	Fluide

IV.6.2. Essai d'information :**1. Objectif de l'essai :**

Les caractéristiques mécaniques du béton d'un ouvrage réel diffèrent généralement de celles des éprouvettes standards (essais d'étude, de convenance ou de contrôle) car ces dernières sont conservées dans les conditions idéales d'une chambre humide.

L'**essai d'information** a pour but d'évaluer les caractéristiques réelles du béton au sein même des éléments de l'ouvrage, en prenant en compte les variations réelles de température et d'humidité relative de l'air.

2. Principe et Modes de Réalisation :

Deux méthodes permettent d'approcher au plus près la réalité de l'ouvrage :

A. Par confection d'éprouvettes moulées :

- **Mise en œuvre** : Réalisation d'éprouvettes sur chantier lors du coulage.
- **Conservation mimétique** : Les éprouvettes doivent subir le même historique que l'ouvrage (même date de démoulage, même exposition au vent, à la pluie ou au soleil, etc.).

B. Par carottage du béton durci :

- **Principe** : Prélèvement direct d'échantillons cylindriques (appelés **carottes**) sur l'ouvrage lui-même à l'aide d'un outil rotatif diamanté appelé **carottier**.
- **Avantage** : Reflète de manière exacte la compacité, le durcissement et la résistance réelle du béton en place.

3. Logistique et Acheminement :

Pour garantir la validité des résultats et ne pas perturber le comportement du béton (notamment l'évolution de sa résistance avant l'écrasement) :

- Le transport des éprouvettes ou des carottes vers le laboratoire d'essais doit impérativement être effectué la veille du jour de l'essai. [11]

IV.6.3. Essais de compression :(Norme NF P 18-406) :**a). Objectif de l'essai :**

L'essai a pour but de déterminer la **résistance à la compression** du béton. Mesuré en laboratoire, cet essai consiste à soumettre des éprouvettes cylindriques à une charge axiale croissante jusqu'à leur rupture.

La résistance à la compression est définie par le rapport entre la charge maximale de rupture enregistrée et la section transversale initiale de l'éprouvette :

$$f_c = \frac{F}{S}$$

Où :

- f_c : Résistance à la compression (en MPa ou N/mm²).
- F : Charge maximale de rupture (en N).
- S : Section transversale de l'éprouvette (en mm²).

b). Équipement nécessaire :

- **Une machine d'essai (Presse hydraulique) :** Une presse de force et de dimensions appropriées à l'éprouvette à tester, répondant strictement aux prescriptions des normes NF P 18-411 et NF P 18-412.
- **Un système de rectification :** Un dispositif permettant de rectifier les extrémités des éprouvettes (matériel de surfaçage au soufre ou rectifieuse à disque diamanté).

c). Rectification des extrémités des éprouvettes :

Conformément à la norme **NF P 18-406**, l'essai de compression doit impérativement être effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées.

Pourquoi la rectification est-elle obligatoire ? > Si les éprouvettes étaient placées brutes sur les plateaux de la presse, les irrégularités de surface empêcheraient d'obtenir une planéité parfaite et une perpendicularité rigoureuse par rapport aux génératrices du cylindre. Cela provoquerait des concentrations de contraintes locales lors de la mise en charge, entraînant une rupture prématurée et masquant la résistance réelle du béton.

La rectification consiste donc à rendre ces surfaces parfaitement planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette. Pour y parvenir, deux méthodes principales sont employées : le surfaçage au soufre et la rectification par usinage.

1. Le surfaçage mécanique :

Le surfaçage mécanique consiste à rectifier les deux faces d'une éprouvette de béton cylindrique 16 × 32 cm à l'aide d'une meuleuse diamantée. Cette opération élimine les irrégularités de surface pour garantir une planéité parfaite, assurant ainsi une répartition uniforme et perpendiculaire de la charge lors de l'essai de compression en laboratoire.



Figure IV-2 : Principe du surfaçage l'éprouvette

2. Choix de la méthode de rectification selon la résistance du béton :

Le type de matériau ou de méthode utilisé pour rectifier les faces dépend directement de la classe de résistance attendue pour le béton (R_c) :

- **Pour les bétons courants ($R_c \leq 50\text{MPa}$)** : Le surfaçage peut se faire à l'aide d'un mélange traditionnel composé de **60%** (en masse) de fleur de soufre et de **40%** de sable fin de granularité inférieure à **0,5 mm**
- **Pour les Bétons Hautes Performances ($50\text{ MPa} \leq R_c \leq 80\text{ MPa}$)** : Le mélange artisanal ne suffit plus. Il est obligatoire d'utiliser un mortier de soufre industriel spécifiquement formulé pour les BHP afin d'éviter l'écrasement de la galette avant celui du béton.
- **Pour les bétons à très haute résistance ($R_c > 80\text{ MPa}$)** : Le soufre atteint ses limites de rigidité. La rectification exige des moyens matériels plus importants, à savoir une **rectifieuse mécanique équipée d'une meule diamantée**. L'éprouvette est alors usinée par abrasion directe du béton de manière à rendre les extrémités parfaitement planes et perpendiculaires aux génératrices.

d). Conduite de l'essai de compression et modes de rupture :**1. Centrage et positionnement de l'éprouvette :**

Après rectification des faces d'extrémité, l'éprouvette cylindrique doit être positionnée sur le plateau inférieur de la presse d'essai. Afin de minimiser l'excentricité de la charge et d'assurer un état de contrainte uniforme, le défaut de centrage admissible doit être inférieur à 1 % du diamètre nominal de l'échantillon. Pour des éprouvettes standards de dimensions 11×22 cm ou 16×32 cm, cette exigence implique une précision millimétrique. L'utilisation d'un gabarit de centrage mécanique est donc indispensable. Ce dispositif doit impérativement prendre appui sur le corps de l'éprouvette et non sur le matériau de surfacage (soufre ou mortier résine), conformément au schéma de configuration présenté sur la **Figure IV-3**.

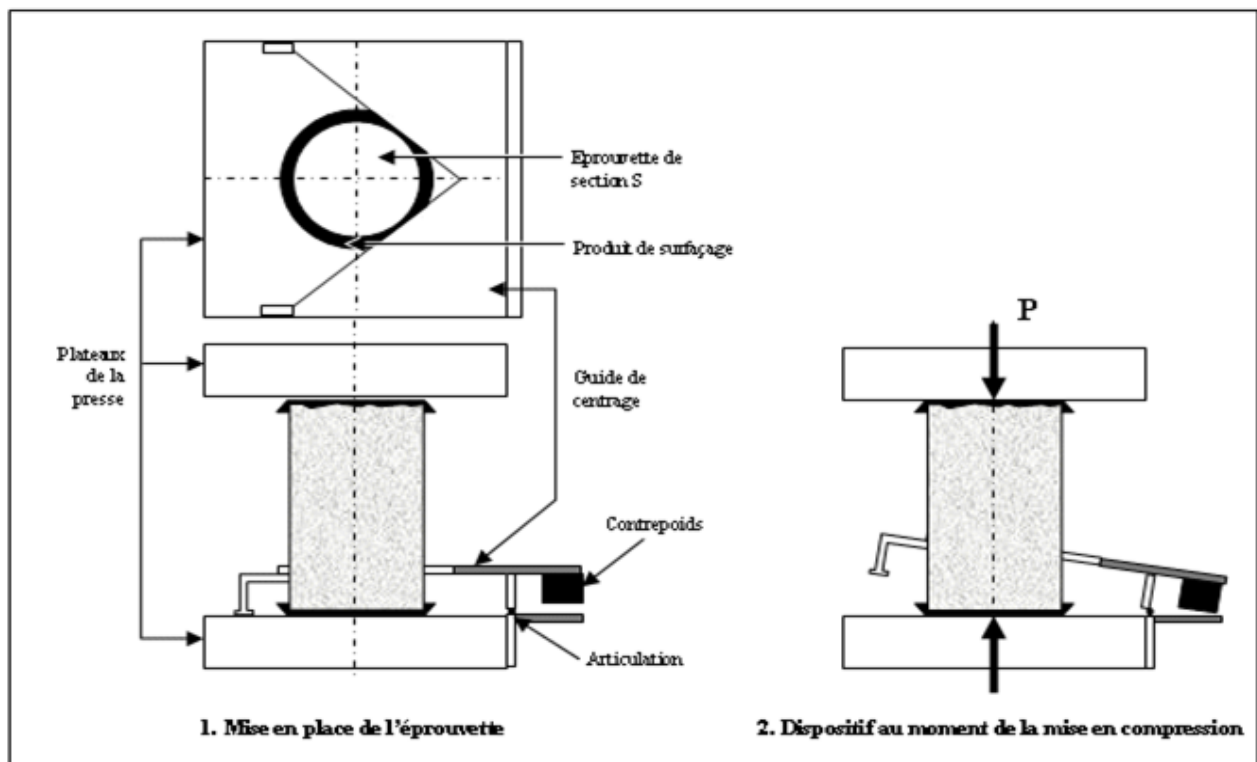


Figure IV-3 : Centrage et positionnement de l'éprouvette

2. Cinétique de mise en charge et expression de la résistance :

La vitesse d'application de la charge doit être constante et régulée à un taux de 0,5MPa/s avec une tolérance stricte de $\pm 0,2$ MPa/s. En termes de force, cela se traduit par des vitesses de chargement spécifiques selon la section de l'éprouvette :

- Pour une éprouvette **11 × 22 cm** : **5 KN/s $\pm$ 2 KN/s**
- Pour une éprouvette **16 × 32cm** : **10 KN/s $\pm$ 4 KN/s**

La résistance à la compression, notée f_c , correspond à la contrainte maximale atteinte sous la charge de rupture P (charge maximale enregistrée). Elle est exprimée en (MPa), arrondie à 0,5 MPa près, selon la relation fondamentale de la mécanique des milieux continus :

$$f_c = \frac{P}{S}$$

Où :

- f_c : la résistance à la compression uniaxiale (en MPa),
- P : la charge maximale de rupture (exprimée en MN),
- S : la section transversale initiale orthogonale de l'éprouvette (en m^2).

Remarque sécuritaire : Pour les bétons à haute résistance ($f_c > 60$ MPa), la rupture peut s'avérer extrêmement fragile et explosive en raison de l'énergie de déformation accumulée. Il est donc obligatoire d'équiper la presse de cages ou d'écrans de protection contre les projections d'éclats.

3. Analyse des modes de rupture et influence du frettage :

En configuration d'essai standard, la rupture du béton se manifeste généralement par le profil caractéristique illustré sur la **Figure IV-4**.

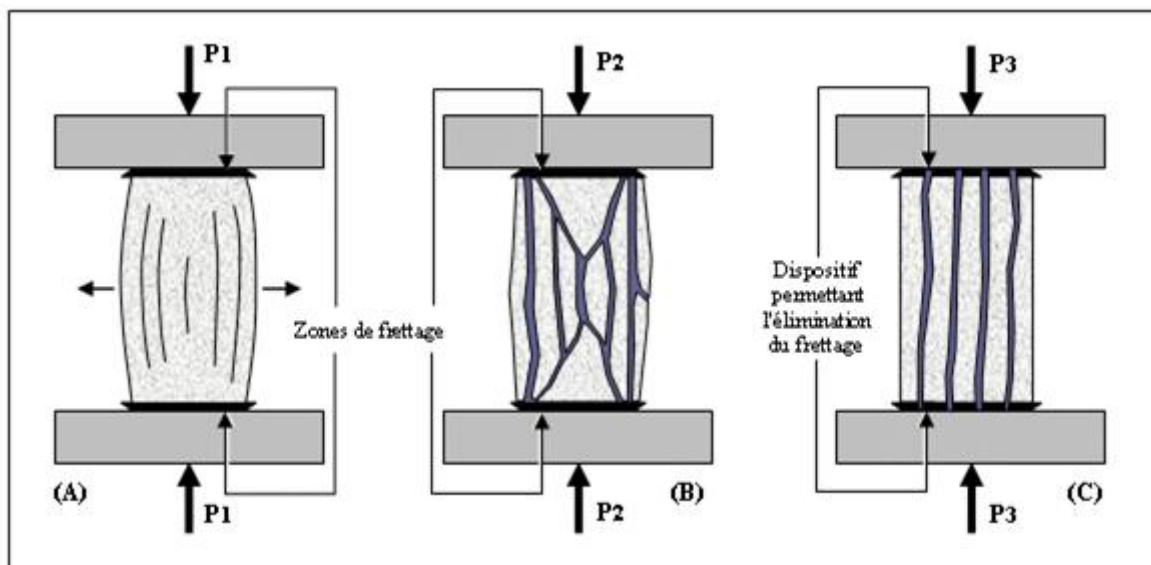


Figure IV.4 : Mode de rupture conique typique sous l'effet du frettage

Ce faciès de rupture se caractérise par la formation de deux cônes tronqués opposés aux extrémités de l'échantillon. Ce phénomène s'explique par les conditions aux limites : le frottement au contact « plateaux de la presse / faces du béton » engendre une restriction des déformations transversales (effet de frettage) dans les zones adjacentes aux plateaux.

À l'inverse, dans la zone médiane de l'éprouvette, l'expansion latérale est libre. Sous l'effet du coefficient de Poisson, la compression axiale engendre des déformations de traction transversale

indirectes (représentées par les vecteurs t sur la (Figure IV-4). Lorsque ces déformations dépassent la capacité limite du matériau, des fissures longitudinales se propagent parallèlement à l'axe de chargement, conduisant à la ruine de la partie centrale. Les volumes d'extrémité, confinés par le fretage, demeurent intacts.

Pour s'affranchir de cet effet de confinement et tendre vers un état de compression uniaxiale pur, il est possible de lubrifier les interfaces (application de graisse ou interposition de membranes en Téflon). Le mode de rupture évolue alors vers un éclatement vertical sur toute la hauteur de l'éprouvette.

Il convient de noter que la charge limite obtenue dans des conditions d'interface lubrifiée ($P_{\text{lubrifiée}}$) est systématiquement inférieure à celle obtenue sans lubrification (P_{standard}). En effet, le fretage naturel exercé par les plateaux rigides apporte un confinement qui augmente artificiellement la capacité portante

Représentation des résultats :

Les résultats, de l'écrasement des éprouvettes confectionnées, obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV-5-a : les résultats de crassement de l'éprouvette a 14 jour

Carrières		Poids	Date d'essai	Age	Résistance à la compression	
					Charge totale en tonne	R_c en kg/cm^2
SARL O. OUALI	E_{P1}	15 ,6	10/05/2026	14	45,227	225
	E_{P2}	15,6			46,990	234
	E_{P3}	15,5			46,810	233
EURL S.L.I.G.O. S	E_{P1}	15 ,4	10/05/2026	14	42,556	212
	E_{P2}	15,5			42,50	212
	E_{P3}	15,4			44,70	223
SARL EL HILAL	E_{P1}	15,8	10/05/2026	14	48,636	242
	E_{P2}	15,7			49,080	244
	E_{P3}	15,8			48,890	243

Tableau IV-5-b : les résultats de crassement de l'éprouvette ont 28 jours

Carrières		Poids	Date d'essai	Age	Résistance à la compression	
					Charge totale en tonne	R _c en kg/cm ²
SARL O. OUALI	E _{p1}	15,6	12/05/2026	28	60,330	300
	E _{p2}	15,7			61,580	306
	E _{p3}	15,6			60,089	299
EURL S.L.I.G.O.S	E _{p1}	15,5	12/05/2026	28	55,00	277
	E _{p2}	15,5			54,580	271
	E _{p3}	15,4			54,336	270
SARL EL HILAL	E _{p1}	15,8	12/05/2026	28	63,548	316
	E _{p2}	15,8			62,580	311
	E _{p3}	15,7			62,660	312

2. Interprétation et discussion des résultats :

Le tableau précédent consigne les valeurs de la résistance à la compression (R_c) mesurées à différentes échéances d'âge du béton. L'analyse de ces données met en évidence des performances mécaniques relativement faibles, jugées peu satisfaisantes pour les granulats issus des carrières n°1, et n°2.

Plusieurs facteurs d'ordre physico-chimique, mécanique و opératoire peuvent justifier ces déficits de résistance :

- **Caractéristiques des granulats :** La qualité intrinsèque des granulats (porosité, angularité, dureté superficielle) ainsi que leurs propriétés chimiques (présence éventuelle d'impuretés ou d'éléments délétères comme les sulfates) peuvent affaiblir l'adhérence de l'auréole de transition entre la pâte de ciment et les granulats.
- **Qualité de l'eau de gâchage :** Une eau non conforme ou contenant des substances organiques/chimiques en excès peut perturber les réactions d'hydratation du ciment, impactant ainsi la cinétique de durcissement.
- **Conditions de mise en œuvre (Serrage) :** Un défaut de vibration lors de la confection des éprouvettes ou, à l'inverse, une ségrégation due à une sur-vibration peut induire une porosité critique au sein de la matrice cimentaire, réduisant de manière significative la compacité du béton et par conséquent sa résistance finale.

IV.7. Conclusion :

L'étude expérimentale menée dans ce chapitre a permis d'évaluer l'influence des granulats provenant de trois carrières de la région de Saïda sur les performances du béton formulé selon la méthode de Faury. Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats ont une incidence directe sur la qualité du béton produit.

Les essais d'équivalent de sable et de valeur au bleu révèlent que les granulats de la carrière SARL EL HILAL présentent la meilleure propreté, avec une faible teneur en éléments argileux ($VB = 0,50$), tandis que ceux de la carrière EURL S.L.I.G.O.S affichent une teneur plus élevée en fines argileuses ($VB = 1,95$) et un équivalent de sable plus faible ($ES = 55,18$). Les granulats de la carrière SARL O. OUALI présentent des caractéristiques intermédiaires et satisfaisantes.

Les essais de résistance à la compression effectués sur les éprouvettes de béton ont mis en évidence une progression normale des résistances entre 14 et 28 jours pour l'ensemble des formulations. Les meilleures performances ont été enregistrées avec les granulats de la carrière SARL EL HILAL, qui ont atteint une résistance moyenne d'environ 243 kg/cm^2 à 14 jours et 313 kg/cm^2 à 28 jours. Les bétons confectionnés à partir des granulats de la carrière SARL O. OUALI ont présenté des résistances intermédiaires, tandis que ceux issus de la carrière EURL S.L.I.G.O.S ont donné les résistances les plus faibles.

Ces résultats confirment l'importance de la qualité des granulats dans le comportement mécanique du béton et montrent que les matériaux issus de la carrière SARL EL HILAL offrent les meilleures aptitudes pour la fabrication d'un béton performant. La méthode de formulation adoptée a permis d'obtenir des bétons répondant aux exigences mécaniques recherchées tout en mettant en évidence les différences de comportement liées à l'origine des granulats.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale :

Le présent travail avait pour objectif d'évaluer la qualité de certains granulats concassés provenant de trois carrières de la région de Saïda et d'étudier leur aptitude à être utilisés dans la fabrication du béton.

L'étude a débuté par une analyse du contexte géographique, géologique et minier de la région de Saïda, mettant en évidence la richesse de son sous-sol en matériaux de construction, notamment les calcaires, les dolomies et les matériaux granulaires largement exploités dans le domaine du génie civil.

Les essais réalisés sur les granulats ont permis de caractériser leurs propriétés physiques, mécaniques et physico-chimiques. Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des matériaux étudiés présente des caractéristiques globalement satisfaisantes pour une utilisation dans les bétons courants. Toutefois, des différences notables ont été observées entre les carrières, notamment en ce qui concerne la propreté des sables, la résistance à l'usure et la résistance à la fragmentation.

L'étude du ciment a permis de vérifier sa conformité aux exigences normatives et de confirmer son aptitude à être utilisé dans la formulation des bétons réalisés dans le cadre de cette recherche.

La formulation du béton par la méthode de Faury, suivie d'une validation expérimentale par essais de compression, a montré que les performances mécaniques obtenues dépendent fortement de la qualité des granulats employés. Les résultats ont mis en évidence la supériorité des granulats de la carrière SARL EL HILAL, qui ont permis d'obtenir les meilleures résistances mécaniques à 14 et 28 jours. Les granulats de la carrière SARL O. OUALI ont également donné des résultats satisfaisants, tandis que ceux de la carrière EURL S.L.I.G.O.S ont présenté des performances relativement inférieures en raison d'une teneur plus importante en fines argileuses.

Au terme de cette étude, il apparaît que les granulats issus des carrières de la région de Saïda constituent une ressource locale de qualité pouvant être valorisée dans la fabrication du béton. Les résultats obtenus soulignent l'importance du contrôle des caractéristiques des granulats et de l'optimisation de la formulation afin de garantir les performances mécaniques et la durabilité des ouvrages en béton. Cette étude contribue ainsi à une meilleure connaissance des matériaux locaux et à leur utilisation rationnelle dans les projets de construction et de travaux publics.

Bibliographique

[1] : **Agence Nationale des Activités Minières (ANAM), Géologie de l'Algérie** : Géologie du Nord et contexte géologique national, Ministère de l'Énergie et des Mines, Alger, Algérie, <https://anam.gov.dz/>

[2] : **Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Saïda (DRE Saïda)**. Rapports annuels sur les ressources hydriques et les infrastructures hydrauliques de la wilaya de Saïda. Saïda.

[3] : **Vila, J.-M. (1980)**. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse d'État, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

[4] : **Aissaoui, D. (1984)**. Étude géologique de l'Atlas tellien occidental (région de Saïda). Thèse de Doctorat, Université d'Oran.

[5] : **Office National de la Recherche Géologique et Minière (ORGM)**. Inventaire des ressources minérales et matériaux de construction de la wilaya de Saïda. Alger. Documentation sur les calcaires, dolomies et granulats.

[6] : **Direction de l'Industrie et des Mines de la Wilaya de Saïda (DIM)**. Rapports d'activité et inventaire des carrières et gisements. Saïda.

[7] : **Benest, M. (1985)**. Évolution géologique de l'Ouest algérien. Université Lyon 1. Contexte géologique des roches carbonatées utilisées comme granulats.

[8] : NF EN 12390-2 : (2019/2012) Essais pour béton durci - Partie 2 : Fabrication et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, AFNOR.

[9] : NF EN 12350-2 : (2012) Essais pour béton frais - Partie 2 : Essai d'affaissement, AFNOR.

[10] : la norme NA EN 12350-2) remplaçant la norme NF P 18-451 ,(relative à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams".

[11] : la norme NF P 18-405 ou NA EN 12504-1 pour les carottes

[12] : la NF EN 933-1 : détermination de la granularité – analyse granulométrique par tamisage